

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б.Н.Ельцина

С.П. Буркин  
Н.А. Бабайлов  
Б.В. Овсянников

**СОПРОТИВЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИИ СПЛАВОВ Al И Mg**  
**СПРАВОЧНОЕ ПОСОБИЕ**

Научный редактор  
профессор, доктор технических наук Ю.Н. Логинов

Екатеринбург  
УрФУ  
2010

УДК 621.7.014.2:669.71/.72(03)

ББК 34.23я2+34.62я2

С64

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.А. Ганаго

С64 Буркин С.П. Сопротивление деформации сплавов Al и Mg: справочное пособие /С.П. Буркин, Н.А. Бабайлов, Б.В. Овсянников. Екатеринбург: УрФУ, 2010. 344 с.

ISBN 978-5-321-01755-5

Приведены систематизированные данные по сопротивлению деформации алюминиевых и магниевых сплавов, полученные при пластометрических испытаниях на растяжение, сжатие и кручение, а также химические составы сплавов отечественных и зарубежных марок.

Дан обзор методик пластометрических испытаний металлов и известных конструкций установок для их проведения. Показаны наиболее распространенные и простые методы аппроксимации кривых упрочнения.

Представлены новые варианты конструктивного исполнения пластометров простой конструкции, изготовление которых возможно на любом металлообрабатывающем предприятии и в любой лаборатории без больших материальных затрат.

Справочник предназначен для инженерно-технических работников металлургических и машиностроительных предприятий, научно-исследовательских, проектных организаций, а также для студентов высших учебных заведений. Приведенные данные могут быть использованы при выполнении курсовых и дипломных работ.

Библиогр.: 57 наим. Табл. 59. Рис. 247. Прил. 1.

УДК 621.7.014.2:669.71/.72(03)

ББК 34.23я2+34.62я2

ISBN 978-5-321-01755-5

© УрФУ, 2010

© Авторы, 2010

## Оглавление

	Стр.
Введение.....	5
1. ПОНЯТИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ.....	9
1.1. Критерий наибольших нормальных напряжений.....	10
1.2. Критерий наибольших линейных деформаций.....	11
1.3. Критерий наибольших касательных напряжений.....	12
1.4. Энергетические критерии пластичности.....	13
1.5. Условия перехода в пластическое состояние металлов и сплавов с анизотропией сопротивления деформации.....	14
1.6. Критерии для материалов с различным сопротивлением деформации при растяжении и сжатии.....	20
2. ФАКТОРЫ И ПАРАМЕТРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ВЕЛИЧИНУ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ.....	22
3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ.....	33
3.1. Методы растяжения.....	33
3.2. Методы испытаний на сжатие.....	40
3.3. Методы испытаний на кручение.....	49
3.4. Другие методы испытаний при определении сопротивления деформации металлов и сплавов.....	58
4. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПЛАСТОМЕТРИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ.....	69
4.1. Кулачковые пластометры.....	72
4.2. Торсионные (ротационные) пластометры.....	85
4.3. Пластометр конструкции УГТУ-УПИ.....	90
4.4. Пластометры для динамических высокоскоростных испытаний.....	102
5. АЛЮМИНИЙ И ЕГО СПЛАВЫ. КЛАССИФИКАЦИЯ, МАРКИРОВКА, ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ, СОПРОТИВЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИИ.....	121
5.1. Маркировка полуфабрикатов из алюминия и его сплавов.....	121
5.2. Технический алюминий.....	126
5.3. Сплавы системы Al-Mn.....	146
5.4. Сплавы системы Al-Mg.....	152
5.5. Сплавы системы Al-Cu-Mn.....	168
5.6. Сплавы системы Al-Cu-Mg.....	171

5.7. Сплавы системы Al-Mg-Si.....	183
5.8. Сплавы системы Al-Mg-Si-Cu.....	193
5.9. Сплавы системы Al-Cu-Mg с добавлением железа и никеля.....	198
5.10. Сплавы системы Al-Zn-Mg .....	201
5.11. Сплавы системы Al-Zn-Mg-Cu.....	206
5.12. Алюминиевые сплавы, легированные Li.....	217
6. МАГНИЙ И ЕГО СПЛАВЫ.....	219
6.1. Магний технический.....	219
6.2. Системы маркировки магния и его сплавов.....	221
6.3. Деформируемые сплавы магния. Марки. Свойства. Сопротивление деформации.....	223
7. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ФУНКЦИЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ В ВИДЕ АНАЛИТИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ.....	229
8. РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ НОВОГО ТОРСИОННОГО ПЛАСТОМЕТРА.....	237
8.1. Вариант конструкции пластометра.....	239
8.2. Реализованная на базе токарного станка конструкция торсионного пластометра.....	244
8.3. Совершенствования конструкции и методики проведения пластометрических испытаний.....	291
8.4. Перспективный вариант конструктивного исполнения торсионного пластометра.....	317
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	322
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	324
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	329



## Введение

В области разработки и совершенствования технологий обработки металлов давлением в наши дни существенно возросли требования к качественному описанию свойств деформируемых металлов и сплавов. Параметры напряженно-деформированного состояния при достаточно сложных схемах нагружения и больших деформациях определяются численными методами с использованием достаточно совершенных пакетов прикладных программ. Однако совершенствование этих пакетов в плане более адекватного представления деформаций и напряжений в особых (сингулярных) областях и сокращение времени расчетной процедуры в малой степени способствует развитию технологий пластической обработки металлов и сплавов. Повышение точности расчета параметров напряженно-деформированного состояния за счет увеличения количества конечных или граничных элементов бесполезно без решения проблем описания свойств деформируемого металла и качественного определения граничных условий. Свойства металла задаются через величину или функции сопротивления деформации. К сожалению, до настоящего времени не существует надежных методов определения сопротивления деформации. Некачественное описание механических характеристик деформируемой среды влечет за собой грубое задание граничных условий при использовании любых законов трения, широко распространенных в практике технологических расчетов обработки металлов давлением. В этом плане полезно вспомнить слова академика Л.Д. Ландау: «...слишком точные вычисления с учетом несуществующих факторов не только бесплодны и излишне усложняют расчет, но могут привести к тому, что существующие в данном явлении закономерности вообще выпадут из рассмотрения... Особенно грубой ошибкой является тщательное вычисление с учетом всевозможных мелких поправок, когда одновременно с этим пренебрегают гораздо большими величинами» [1].

Пренебрежение сопротивлением деформации и граничными условиями при решении краевых задач теории пластичности и ОМД сводит на нет всю точность расчета параметров НДС, которую могут обеспечить современные программы, реализующие методы конечных и граничных элементов.

Трудно задать даже исходные значения сопротивления деформации до начала процесса пластического формоизменения из-за не-

возможности точного описания исходных температурных полей заготовки и исходной химической и структурной неоднородности металла. Как литой, так и деформированный металл обладает анизотропией механических характеристик, которую также при современном уровне развития теории пластичности невозможно задать даже на примитивном уровне. В процессе развития пластического формоизменения сопротивление металла непрерывно меняется во всех точках деформируемого тела. Формируется новый тип деформационной анизотропии (текстуры деформации). При горячей обработке в связи с развитием процессов возврата (рекристаллизации) текстуры деформации наследуются в текстуры рекристаллизации, и механизм этого преобразования и формирования текущих и конечных анизотропных механических свойств металла пока не поддается количественному описанию.

Методы конечных элементов позволяют рассчитывать тепловые поля в деформируемом металле, но лишь в том случае, если правильно задано сопротивление деформации, от которого зависит работа формоизменения и, следовательно, выделяемое при деформации тепло. С другой стороны, неточность в расчете температуры металла влечет за собой ошибки в определении сопротивления деформации. Образуется неразрешимый «замкнутый круг», и совершенствование МКЭ не дает выхода на правильное решение, а лишь приводит к увеличению длительности расчетов и к дополнительным (бессмысленным) материальным затратам.

Наиболее энергоемкие и трудно реализуемые процессы ОМД, такие как прессование и штамповка (особенно в закрытых штампах), при постановке краевой задачи вынуждают из-за высоких контактных давлений задавать граничные условия с помощью закона трения Зибеля  $\tau = \psi \cdot \tau_s$ , где  $\tau_s$  – сопротивление металла сдвиговой деформации. Отсюда легко понять невозможность описания контактных условий на границах металл – инструмент без надежного представления динамики изменения сопротивления деформации. Контактное трение определяет интенсивность деформаций в приконтактном слое и тепловыделение от работы сил трения и от дополнительных пластических сдвигов. Снова образуется «замкнутый круг», который никакими методами механики деформируемого твердого тела не разрывается без создания надежной модели сопротивления деформации. Если трение описывается законом Кулона  $\tau = f \cdot p$ , где  $p$  – контактное давление, то возникает необходимость определения  $p$ , что не-

возможно сделать без знания сопротивления деформации. Можно проанализировать все остальные известные законы трения и убедиться, что определить напряжение контактного трения и, следовательно, правильно сформулировать краевые условия задачи пластического течения нельзя без знания текущих значений сопротивления деформации в приконтактном слое обрабатываемого металла.

Сопротивление деформации, выражаемое чаще всего пределом текучести  $\sigma_s$  или условным пределом текучести  $\sigma_{0.2}$  ( $\sigma_{0.1}$ ,  $\sigma_{0.5}$ ,  $\sigma_{0.05}$  и т.д.), часто рассматривается в общем списке механических свойств материалов, к которым относятся:

- прочность – т.е. сопротивление материала деформации и разрушению;
- упругость – способность материала восстанавливать свою форму и объем после прекращения действия внешних сил или других причин, вызывающих деформацию;
- пластичность – способность материала под действием внешних сил изменять, не разрушаясь, свою форму и размеры и сохранять остаточные деформации после устранения этих сил;
- твердость – сопротивление материала местной пластической деформации, возникающей при внедрении в него более твердого тела (индентора);
- ударная вязкость – способность материала сопротивляться действию ударных нагрузок;
- истираемость – способность материала изнашиваться под действием сил трения;
- ползучесть (крип) – медленное нарастание во времени пластической деформации материала при силовых воздействиях, меньших тех, которые могут вызвать остаточную деформацию при испытаниях обычной длительности;
- релаксация напряжений – постепенное изменение напряжений в теле при постоянной его деформации;
- длительная прочность – сопротивление материала механическому разрушению под действием длительно приложенной постоянной нагрузки при высокой температуре;
- усталость материала – постепенное накопление повреждений материала под действием повторно-переменных напряжений, приводящих к уменьшению долговечности, образованию трещин и разрушению [2].

Даже этим перечнем не исчерпывается список опытно определяемых механических характеристик материалов и, в частности, металлов и сплавов.

Вся совокупность механических свойств металлов используется для оценки эксплуатационных характеристик металлоизделий, а производителями этих изделий – для количественного определения технических требований и браковочных признаков.

Из этого перечня свойств металлопродукции сопротивление металла деформации выделяется тем, что эта характеристика не только определяет эксплуатационные свойства, но и выступает как средство формирования всех остальных механических свойств на этапе пластического формоизменения. Следует учитывать, что «сказочное» время, когда от технолога ОМД требовалось только предсказать формоизменение и не ошибиться в выборе оборудования, давно закончилось. Велением времени является требование к технологии как к инструменту формирования заданных механических и физических свойств не в среднем по объему изделия, а в отдельных его элементах.

Слишком много параметров определяют величину сопротивления деформации как в исходном состоянии металла (заготовка), так и в процессе развития процесса пластической обработки. У каждого конкретного металла и сплава на сопротивление деформации оказывают влияние структура металла, температура, степень и скорость деформации. Связать сопротивление деформации со структурой сложно, поскольку она определяется не только перечисленными параметрами обработки, но и схемой напряженного состояния. Считается, что последняя не влияет на величину сопротивления деформации. Однако это справедливо лишь в том случае, когда схема нагружения или изменение контактных условий трения не преобразуют структуру во время деформации.

Параллельно развиваются два метода определения сопротивления деформации: теоретический (структурный) и экспериментальный. Следует согласиться с мнением автора [1], что «закономерности и аномалии изменения сопротивления деформации и пластичности трудно поддаются теоретическому описанию, поэтому основным методом исследования этих величин был и остается эксперимент». Сложность структурного подхода к теоретическому определению сопротивления деформации хорошо иллюстрирует большое количество

введенных в анализ качественных и количественных характеристик структуры [1]:

- вектор Бюргерса;
- параметр кристаллической решетки;
- атомный (ионный) радиус;
- конфигурация ионного остова;
- размер субзерна или дислокационной ячейки;
- плотность дислокаций, в том числе подвижных;
- угол разориентации ячеек для субмикроскопического уровня;
- размер зерна, количество и характерный размер фаз для микроуровня;
- объемы ротации, плотность дисклинаций или дисклинационных диполей для мезоуровня;
- наличие пор, усадочных раковин, ликваций – для макроуровня.

Такое изобилие структурных факторов, естественно, породило большое количество эмпирических моделей, описывающих связь структуры и свойств металла. Например, соотношение Петча – Холла  $\sigma_s = a + b \cdot d^{-0,5}$ , где  $d$  – размер зерна;  $a$  и  $b$  – размерные эмпирические коэффициенты, определяемые для конкретного металла или сплава в конкретном состоянии. Это соотношение достаточно удовлетворительно работает при описании недеформированного металла. По мнению автора [1], соотношение Петча – Холла не учитывает влияние на сопротивление деформации (в частности, предела текучести  $\sigma_s$ ) предварительной пластической деформации. Кроме того,  $\sigma_s$  существенно зависит от температуры, тогда как размер зерна отожженного и не имеющего фазовых превращений металла остается постоянным.

## 1. Понятие сопротивления деформации

Сопротивлением металла  $\sigma_s$  пластической деформации называется напряжение одноосного растяжения или сжатия в условиях развитой пластической деформации [3]. Эта величина напряжения характеризует переход металла из упругого в пластическое состояние. Но, по определению, она характеризует этот переход лишь при линейной схеме напряженного состояния, когда осевое напряжение является одним из главных  $\sigma_{11} = \sigma_s$ , а два других главных напряжения  $\sigma_{22} = \sigma_{33} = 0$ . В практике обработки металлов давлением не приме-

няются деформации с линейной схемой напряженного состояния, поэтому описание критериев перехода металла в пластическое состояние при сложных (в общем случае объемных) схемах напряженного состояния осуществляется на уровне гипотез, в той или иной степени подтверждаемых экспериментами. Сложность однозначного определения наиболее правдоподобной гипотезы и выбора универсального критерия перехода металла в пластическое состояние связана с тем, что ни одна из известных гипотез не находит полного подтверждения во всех способах деформирования и всех схемах напряженного состояния.

Приведем некоторые из известных критериев перехода металла в пластическое состояние. Эти критерии в механике конструкций и сопротивлении материалов часто называют критериями прочности, поскольку переход элементов любой металлоконструкции в пластическое состояние рассматривается как разрушение [4]. Вместе с тем наступление пластических деформаций для какого-либо материала может определяться одним критерием, а разрушение этого же материала – другим критерием. Например, А.М.Жуков в работе [5] показывает экспериментально, что для «мягкой» пластической стали наилучшим критерием прочности при двухосном растяжении является критерий наибольших нормальных напряжений, в то время как наилучшим критерием пластичности для этой же стали является критерий энергии формоизменения.

### **1.1. Критерий наибольших нормальных напряжений**

Пластическая деформация наступает тогда, когда наибольшие по абсолютной величине главные напряжения достигают некоторого предельного значения. Считается, что этим предельным значением является сопротивление деформации  $\sigma_s$ . Условие пластичности согласно этому критерию записывается в виде  $|\sigma_{11}| = \sigma_s$ . При этом принято  $\sigma_{11} \geq \sigma_{22} \geq \sigma_{33}$ . Естественно считать, что если  $|\sigma_{33}| > |\sigma_{11}|$ , то  $|\sigma_{33}| = \sigma_s$ . Предельная поверхность для критерия наибольших нормальных напряжений может быть представлена в виде куба в пространстве модулей главных напряжений.

Как показала экспериментальная проверка, критерий удовлетворительно описывает переход в пластическое состояние лишь при однознаковых схемах напряженного состояния. Для комбинации растя-

жения со сжатием расчеты по этому критерию дают завышенное по сравнению с действительным сопротивление материала пластическому деформированию  $\sigma_s$ . Также для случая всестороннего сжатия получают сильно заниженные значения сопротивления материала внешним воздействиям. Ошибка стремится к нулю при  $\sigma_{22}$  и  $\sigma_{33} \rightarrow 0$ . Таким образом, критерий наибольших нормальных напряжений имеет в основном историческое значение и в точности отображает действительность лишь при одноосных напряженных состояниях растяжения или сжатия.

## 1.2. Критерий наибольших линейных деформаций

Переход материала в пластическое состояние (или разрушение) начинается тогда, когда наибольшая по абсолютной величине линейная деформация удлинения достигает некоторого предельного значения. Критерий введен в рамках гипотезы Мариотта. По другому определению, начало пластической деформации происходит тогда, когда наибольшая по абсолютной величине линейная (осевая) деформация  $\varepsilon$  достигает некоторого предельного значения.

Главные деформации в соответствии с законом Гука выражаются формулами

$$\begin{aligned}\varepsilon_{xx} &= \frac{1}{E} [\sigma_{xx} - \mu \cdot (\sigma_{yy} + \sigma_{zz})], \\ \varepsilon_{yy} &= \frac{1}{E} [\sigma_{yy} - \mu \cdot (\sigma_{xx} + \sigma_{zz})], \\ \varepsilon_{zz} &= \frac{1}{E} [\sigma_{zz} - \mu \cdot (\sigma_{xx} + \sigma_{yy})].\end{aligned}$$

При одноосном напряженном состоянии пластическая деформация наступает, когда  $\varepsilon_{\max} = \sigma_s / E$ ; при сложном напряженном состоянии условие пластичности имеет вид

$$|\varepsilon_{\max}| = \left| \frac{1}{E} \cdot [\sigma_{11} - \mu(\sigma_{22} + \sigma_{33})] \right| = \frac{\sigma_s}{E}.$$

Критерий наибольших линейных деформаций получил широкое применение в инженерной практике, в частности при проектировании артиллерийских стволов. Однако исходя из анализа многочисленных экспериментов следует вывод, что этот критерий не может использоваться в качестве универсального критерия, применяемого для любых схем напряженного состояния.

### 1.3. Критерий наибольших касательных напряжений

Пластическая деформация металлов и сплавов наступает тогда, когда наибольшее касательное напряжение

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_{11} - \sigma_{33}}{2}$$

достигает некоторого определенного значения, называемого сопротивлением металла деформации сдвига  $\tau_s$ . Этот критерий был предложен Н. Треска на основе экспериментов по штамповке и прессованию металлов и сплавов. В случае одноосного растяжения или сжатия, когда  $\sigma_{22} = \sigma_{33} = 0$ , критерий наибольших касательных напряжений приводит к соотношению

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_{11}}{2} = \frac{\sigma_s}{2} = \tau_s,$$

и таким образом в общем случае пластическая деформация должна наступить, когда  $\sigma_{11} - \sigma_{33} = \sigma_s$ .

В системе координат главных напряжений  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$  и  $\sigma_{33}$  это условие, называемое условием пластичности Треска – Сен-Венана, определяет шестигранную призму с осью, перпендикулярной девиаторной плоскости, которая в пересечении с последней дает правильный шестиугольник, вписанный в круг радиуса  $\sigma_s/\sqrt{2}$ . Если отказаться от традиционно принимаемого условия  $\sigma_{11} \geq \sigma_{22} \geq \sigma_{33}$ , то условие текучести материала записывается в виде одного из следующих равенств:

$$|\sigma_{11} - \sigma_{22}| = \sigma_s; |\sigma_{22} - \sigma_{33}| = \sigma_s; |\sigma_{33} - \sigma_{11}| = \sigma_s.$$

Эти равенства можно объединить в одно [6]:

$$[(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 - \sigma_s^2] \cdot [(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 - \sigma_s^2] \cdot [(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 - \sigma_s^2] = 0.$$

При использовании в расчетах условия пластичности Треска – Сен-Венана необходимо упорядочение главных напряжений. Чаще всего это заранее не известно, и приходится полагаться на интуицию и проводить аналогии с подобными или близкими по схеме нагружения задачами.

Недостатком этого условия текучести (пластичности) следует считать отсутствие учета влияния промежуточного главного напряжения  $\sigma_{22}$ .



Предельное состояние в случае комбинации растяжения со сдвигом по критерию наибольших касательных напряжений можно получить, записав главные напряжения для этого случая в виде

$$\sigma_{11} = \frac{\sigma_{xx}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_{xx}}{2}\right)^2 + \sigma_{xy}^2}, \quad \sigma_{33} = \frac{\sigma_{xx}}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_{xx}}{2}\right)^2 + \sigma_{xy}^2}.$$

Учитывая условие  $\sigma_{11} - \sigma_{33} = \sigma_s$ , получаем уравнение  $\frac{\sigma_{xx}^2}{4} + \sigma_{xy}^2 = \sigma_s^2$ , которое определяет предельную кривую в форме эллипса.

Для некоторых металлов и сплавов представление экспериментальных данных с помощью этого критерия оказывается лучше, чем с помощью других известных критериев. Например, в работе [4] приведено сравнение опытных, переводящих в пластическое состояние, напряжений с теоретическими, рассчитанными по теории наибольших касательных напряжений для алюминиевого сплава 24S-T (канадский аналог сплава Д16 по ГОСТ 4784), показывающее вполне удовлетворительную согласованность теории с опытными данными.

#### 1.4. Энергетические критерии пластичности

Материал переходит в состояние пластического деформирования, когда полная удельная энергия деформации достигает некоторого предельного значения (гипотеза Бельтрами). С учетом того, что закон Гука выполняется до момента перехода металла в пластическое состояние, полная удельная энергия деформации представляется выражением

$$A = \frac{\sigma_{xx}\epsilon_{xx}}{2} + \frac{\sigma_{yy}\epsilon_{yy}}{2} + \frac{\sigma_{zz}\epsilon_{zz}}{2} + \sigma_{xy}\epsilon_{xy} + \sigma_{xz}\epsilon_{xz} + \sigma_{yz}\epsilon_{yz}.$$

Условие текучести в рамках этой гипотезы представляется формулой

$$\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 + \sigma_{zz}^2 - 2\mu(\sigma_{xx}\sigma_{yy} + \sigma_{yy}\sigma_{zz} + \sigma_{zz}\sigma_{xx}) + 2(1-\mu)(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{zx}^2) \leq \sigma_s^2.$$

Более продуктивным оказался энергетический критерий Губера – Мизеса – Генки, согласно которому пластическое состояние наступает тогда, когда удельная энергия формоизменения достигает некоторого предельного значения.

Полная удельная энергия деформации представляется в случае справедливости закона Гука до момента перехода металла в пласти-

ческое состояние как сумма удельных работ изменения объема и формы  $A = A_o + A_\phi$ , причем

$$A_o = 3\sigma_{cp}\varepsilon_{cp},$$

$$A_\phi = \frac{1+\mu}{6E} \left[ (\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 6(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{zx}^2) \right],$$

где  $E$  – модуль нормальной упругости;  $\mu$  – коэффициент Пуассона.

В общем случае условие пластичности имеет вид

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 6(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{zx}^2)} = \sigma_s.$$

Вводя понятие интенсивности касательных напряжений –

$$T = \frac{1}{\sqrt{6}} \sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2}, \quad \text{условие текучести}$$

можно записать в виде  $T = \sigma_s / \sqrt{3}$ , поскольку при одноосном растяжении  $\sigma_{11} = \sigma_s$ ;  $\sigma_{22} = \sigma_{33} = 0$ , а при одноосном сжатии  $\sigma_{11} - \sigma_{22} = \sigma_s$ ;  $\sigma_{33} = -\sigma_s$ ,  $\sigma_s / \sqrt{3} = \tau_s$ . Эта величина равна пределу текучести при чистом сдвиге. Следовательно, условие текучести Губера – Мизеса – Треска записывается в виде  $T = \tau_s$  [3].

Все рассмотренные гипотезы и полученные в их рамках критерии перехода металла в пластическое состояние справедливы лишь для изотропных материалов, а также для металлов и сплавов, у которых сопротивление деформации одинаково при растяжении и сжатии.

### **1.5. Условия перехода в пластическое состояние металлов и сплавов с анизотропией сопротивления деформации**

Гипотеза Мизеса была распространена на материалы с анизотропией сопротивления деформации. Под анизотропией понимается зависимость свойств материала от направления в пространстве. Поскольку все металлы при обычных условиях охлаждения расплава формируют кристаллическую структуру, они изначально приобретают анизотропные как физические, так и механические свойства. Каждый кристалл металла анизотропен, и степень анизотропии зависит от типа кристаллической решетки. Монокристаллы любых материалов проявляют существенную зависимость свойств от положения оси, вдоль которой определяется рассматриваемая характеристика материала. В заготовках, предназначенных для ОМД, металлы и сплавы имеют поликристаллическую структуру, а естественная разориенти-

ровка кристаллов позволяет рассматривать на макроуровне любое кристаллическое тело как изотропное. Однако в результате пластической деформации изначально изотропные материалы приобретают анизотропию, в частности механических свойств. Одной из причин деформационной анизотропии поликристаллических тел является формирование текстуры, т.е. системы закономерно ориентированных кристаллитов [6].

В общем случае анизотропного материала Мизесом было предложено так называемое квадратичное условие пластичности для анизотропных материалов, которое в сокращенной тензорной записи (суммирование по повторяющимся индексам) имеет вид [6]:

$$A_{ijkl}\sigma_{ijkl}\sigma_{kl} = 1,$$

где  $A_{ijkl}$  – постоянные, совокупность которых (в количестве 21) определяется экспериментально и характеризует свойства конкретного материала.

Тела, у которых можно выделить три взаимно перпендикулярные плоскости симметрии по отношению к рассматриваемому физическому или механическому свойству, называются ортотропными (например, катаный листовой материал). Совместив оси координат ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) с осями симметрии (например, для листа это направление прокатки и два перпендикулярные к нему направления), можно условие текучести ортотропного материала записать в виде

$$A_{1111}\sigma_{xx}^2 + A_{2222}\sigma_{yy}^2 + A_{3333}\sigma_{zz}^2 + 4A_{1212}\sigma_{xy}^2 + 4A_{2323}\sigma_{yz}^2 + 4A_{3131}\sigma_{zx}^2 + \\ + A_{1122}\sigma_{xy}\sigma_{yy} + 2A_{2233}\sigma_{yy}\sigma_{zz} + 2A_{3311}\sigma_{zz}\sigma_{xx} = 1,$$

где свойства конкретного материала представлены лишь девятью постоянными, которые можно определить, применяя условие текучести ортотропного материала для частных случаев одноосных растяжений в направлении осей координат и сдвигов между ними. В конечном виде условие пластичности для ортотропного материала, у которого сопротивления деформации вдоль осей координат  $x$ ,  $y$ ,  $z$  имеют соответствующие значения  $\sigma_{sx}$ ,  $\sigma_{sy}$  и  $\sigma_{sz}$ , представимо в форме [6]:

$$\frac{\sigma_{xx}^2}{\sigma_{sx}^2} + \frac{\sigma_{yy}^2}{\sigma_{sy}^2} + \frac{\sigma_{zz}^2}{\sigma_{sz}^2} - \sigma_{xx}\sigma_{yy}\left(\frac{1}{\sigma_{sx}^2} + \frac{1}{\sigma_{sy}^2} - \frac{1}{\sigma_{sz}^2}\right) - \sigma_{yy}\sigma_{zz}\left(\frac{1}{\sigma_{sy}^2} + \frac{1}{\sigma_{sz}^2} - \frac{1}{\sigma_{sx}^2}\right) - \\ - \sigma_{zz}\sigma_{xx}\left(\frac{1}{\sigma_{sz}^2} + \frac{1}{\sigma_{sx}^2} - \frac{1}{\sigma_{sy}^2}\right) + \frac{\sigma_{xy}^2}{\tau_{sxy}^2} + \frac{\sigma_{yz}^2}{\tau_{sy z}^2} + \frac{\sigma_{zx}^2}{\tau_{s z x}^2} = 1,$$

где  $\tau_{sij}$  – сопротивление деформации сдвига в направлении от оси  $i$  к оси  $j$ .

В случае одноосного растяжения в направлении оси  $x$  сопротивление деформации в направлении произвольной оси, составляющей с осью  $x$  угол  $\alpha$ ,

$$\sigma_{s\alpha} = \left[ F_0 \sin^2 \alpha + G_0 \cos^2 \alpha + H_0 + \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha (2N_0 - F_0 - 4H_0 - G_0) \right]^{1/2},$$

$$\text{где } \operatorname{tg} \alpha = \frac{N_0 - G_0 - 2H_0}{N_0 - F_0 - 2H_0}; \quad N_0 = \frac{1}{2\tau_{sxy}^2}; \quad H_0 = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\sigma_{sx}^2} + \frac{1}{\sigma_{sy}^2} - \frac{1}{\sigma_{sz}^2} \right);$$

$$F_0 = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\sigma_{sy}^2} + \frac{1}{\sigma_{sz}^2} - \frac{1}{\sigma_{sx}^2} \right); \quad G_0 = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\sigma_{sz}^2} + \frac{1}{\sigma_{sx}^2} - \frac{1}{\sigma_{sy}^2} \right).$$

На рис.1 представлены графики зависимости условного предела текучести от угла наклона оси образца к направлению прокатки листов из алюминиевых сплавов [7].

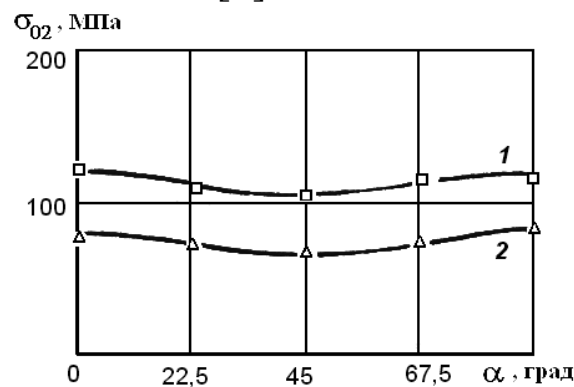


Рис. 1. Графики зависимости условного предела текучести от угла наклона оси образца к направлению прокатки: 1 – АМгб6; 2 – АМц

При прессовании алюминиевых сплавов анизотропия механических свойств и, в частности, сопротивление металла деформации проявляется наиболее сильно вследствие применения больших деформаций. Следует отметить, что среди металлов с ГЦК-структурой анизотропия предела текучести наиболее обстоятельно изучена именно у алюминиевых сплавов [8]. Степень анизотропии этих сплавов зависит не только от применяемого технологического варианта, но и от абсолютных и относительных размеров прессуемых профилей. Как следует из результатов исследований В.И. Добаткина [9], механические свойства прессованных профилей зависят от соотношения размеров сечения. Свойства в направлении большей оси сечения при наличии пресс-эффекта значительно выше, чем в направлении меньшей оси.

Это определяется тем, что волокна металла в пресс-изделиях из алюминиевых сплавов обычно ориентированы не только вдоль оси прессования, но и вдоль большей оси поперечного сечения, что проявляется тем ярче, чем больше отношение осей профиля. В профилях сложной формы зерна в поперечном направлении ориентируются по конфигурации сечения, в результате этого свойства в различных зонах сечения в одном и том же направлении могут быть существенно разными.

Существующие мнения о причинах анизотропии предела текучести алюминиевых сплавов противоречивы. «В зависимости от природы сплава, типа и размеров полуфабриката, режимов его обработки и упрочнения влияние отдельных факторов на анизотропию  $\sigma_{02}$  может усиливаться или уменьшаться, а их взаимодействие может приводить к усилению или ослаблению этого влияния. Поэтому во избежание ошибок здесь также целесообразен конкретный подход к объяснению причин анизотропии  $\sigma_{02}$  применительно к каждой группе сплавов и к видам полуфабрикатов с учетом режимов упрочняющей обработки» [8]. Оценивать анизотропию  $\sigma_{02}$  соотношением его продольных и поперечных значений в общем случае недостаточно, поскольку возможно существование направлений, в которых анизотропия выражена наиболее резко. В качестве примера можно рассмотреть влияние ориентировки вырезанных образцов (угол  $\alpha$  определяет направление оси образца по отношению к плоскости прессования) на величину  $\sigma_{02}$  (табл.1, 2).

Таблица 1

Зависимость условного предела текучести прессованной полосы сечением 42х250 мм из алюминиевого сплава В95Т1 от ориентировки образцов на растяжение

Ориентировка образца		$\sigma_{02}$ , МПа
плоскость	угол $\alpha$ , град	
Прессования	0	539
	15	498
	30	464
	45	455
	60	450
	75	450
	90	465

Окончание табл.1

Ориентировка образца		$\sigma_{02}$ , МПа
плоскость	угол $\alpha$ , град	
Поперечное сечение	0	485
	15	473
	30	457
	45	439
	60	439
	75	449
	90	459
Вертикальная продольная	0	529
	15	489
	30	475
	45	452
	60	503
	75	463
	90	459

Таблица 2

Зависимость сопротивления деформации прессованных полос из сплава Д16 от структуры и ориентировки образцов [8]

Сечение полосы, мм	Структура	Угол между осью образца и плоскостью прессования	$\sigma_{02}$ , МПа		
			свежезака- ленное	есте- ственно состарен- ное	искус- ственно состарен- ное
1	2	3	4	5	6
42x250	Нерекристал- лизованная с текстурой про- катки	0	147	382	382
		15	-	310	320
		45	144	278	301
		60	155	304	353
		90 (по тол- щине)	165	287	319
	Рекристаллизо- ванная	в направле- нии ширины 0	123	240	323
		45	123	245	320
		60	-	255	319
		90 (по тол- щине)	124	258	332

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6
100x100	Нерекристаллизованная с текстурой прессования	В направлении ширины			
		0	215	387	-
		45	134	274	-
		60	131	294	-
		90	129	280	-

В общем случае анизотропия  $\sigma_{02}$  полуфабрикатов из алюминиевых сплавов колеблется в широких пределах. В табл.3 приведены опытные данные испытаний прессованных и катаных изделий, из которой следует зависимость анизотропии  $\sigma_{02}$  от марки сплава и режимов термообработки.

Таблица 3

Зависимость  $\sigma_{02}$  полуфабрикатов из алюминиевых сплавов от ориентировки образцов

Сплав	Полуфабрикат	Направление оси образца	$\sigma_{02}$ , МПа	Максимальный коэффициент анизотропии
АВТ1	Прессованная полоса 65x200мм	Продольное	285	1,12
		Поперечное	261	
		Высотное	254	
АД31Т1	То же	Продольное	282	1,63
		Поперечное	216	
		Высотное	173	
Д16Т	Прессованная полоса 50x150 мм	Продольное	394	1,33
		Поперечное	325	
		Высотное	295	
	Катаная плита толщиной 40...50 мм	Продольное	321	1,07
		Поперечное	301	
		Высотное	315	
В95Т1	Прессованная полоса 50x150 мм	Продольное	535	1,2
		Поперечное	473	
		Высотное	448	
В95Т2	Прессованная полоса 50x150 мм	Продольное	484	1,16
		Поперечное	437	
		Высотное	416	
	Катаная плита толщиной 80...85 мм	Продольное	456	1,06
		Поперечное	442	
		Высотное	432	

Сплав	Полуфабрикат	Направление оси образца	$\sigma_{02}$ , МПа	Максималь- ный коэффи- циент анизо- тропии
В95Т3	Катаная плита толщиной 80...85 мм	Продольное	407	1,04
		Поперечное	392	
		Высотное	397	
1915	То же, закалка, есте- ственное старение 30 сут.	Продольное	309	1,57
		Поперечное	245	
		Высотное	196	
	То же, искусственное старение 100 <sup>0</sup> С, 24 ч 175 <sup>0</sup> С, 4 ч	Продольное	389	1,23
		Поперечное	326	
		Высотное	316	

### 1.6. Критерии для материалов с различным сопротивлением деформации при растяжении и сжатии [4]

*Критерий Мора* основан на предположении, что среднее главное напряжение  $\sigma_{22}$  оказывает малое влияние на наступление предельного состояния и может не учитываться. Рекомендуется в случаях сложного напряженного состояния для задания условия перехода металла в пластическое состояние использовать условие

$\sigma_{11} - \frac{\sigma_s^p}{\sigma_s^c} \sigma_{33} = \sigma_s^p$ , где  $\sigma_s^p$  и  $\sigma_s^c$  – соответственно сопротивление деформации при простом растяжении и сжатии.

*Критерий Шлейхера* для материалов, неодинаково сопротивляющихся растяжению и сжатию, принимает величину полной удельной энергии деформации, причем предельное ее значение рассматривается как некоторая функция от среднего напряжения

$$\sigma = \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}}{3} = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}}{3}.$$

В предположении линейной зависимости удельной энергии от  $\sigma$  предложено условие пластичности в форме

$$\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 + \sigma_{zz}^2 - 2\mu(\sigma_{xx}\sigma_{yy} + \sigma_{xx}\sigma_{zz} + \sigma_{yy}\sigma_{zz}) + 2(1+\mu)(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{xz}^2 + \sigma_{yz}^2) - (\sigma_s^c - \sigma_s^p)(\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}) = \sigma_s^p \sigma_s^c,$$

где  $\mu$  – коэффициент Пуассона.



В пространстве главных напряжений  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$  и  $\sigma_{33}$  условие пластичности Шлейхера представляется поверхностью эллипсоида со смещенным относительно начала координат центром.

В литературе нет сведений об экспериментальной проверке критериев Мора и Шлейхера, поэтому их использованием требует известной осторожности.

В соответствии с *критерием П.П. Баландина* для изотропного однородного упругого материала мерой прочности в пределах упругости служит величина удельной потенциальной энергии, связанной с изменением формы тела, причем предельное значение при переходе в пластическое состояние или при разрушении не постоянно, а зависит от напряженного состояния, именно линейно от  $\sigma$ , а входящие в условие пластичности параметры  $\sigma_s^P$  и  $\sigma_s^C$  определяются из простейших опытов на растяжение и сжатие.

В развернутом виде критерий П.П. Баландина представляется в виде

$$\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 + \sigma_{zz}^2 - \sigma_{xx}\sigma_{yy} - \sigma_{xx}\sigma_{zz} - \sigma_{yy}\sigma_{zz} + 3(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{xz}^2 + \sigma_{yz}^2) - (\sigma_s^P - \sigma_s^C)(\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}) = \sigma_s^P \sigma_s^C.$$

При  $\sigma_s^P = \sigma_s^C = \sigma_s$  этот критерий сводится к критерию удельной энергии формоизменения (см. п.1.4).

В пространстве главных напряжений этому условию соответствует поверхность параболоида вращения, пересекающая свою ось в одной точке, которая соответствует предельному значению напряжения в случае всестороннего равномерного растяжения. С другой стороны, поверхность разомкнута, т.е. при всестороннем сжатии переход в пластическое состояние невозможен, а прочность не ограничена.

Экспериментальная проверка критерия П.П. Баландина на образцах из сталей У12, Р18, 9ХС и других дала положительные результаты. Однако полного экспериментального обоснования этот критерий не получил.

*Критерий Ю.И. Янга* представляется в виде полинома второй степени, симметричного относительно главных напряжений (изотропный материал):

$$(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{11} - \sigma_{33})^2 + a(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})^2 + b(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}) = c,$$

где постоянные  $a$ ,  $b$  и  $c$  находятся из опытов на одноосное растяжение (определяется  $\sigma_s^P$ ), сжатие ( $\sigma_s^c$ ) и чистый сдвиг ( $\tau_s$ ).

В развернутом виде условие Ю.И. Янга принимает вид:

$$\frac{\sigma_s^P \sigma_s^c}{2\tau_s^2} (\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 + \sigma_{zz}^2 + 2\sigma_{xy} + 2\sigma_{xz} + 2\sigma_{yz}) + \left(1 - \frac{\sigma_s^P \sigma_s^c}{2\tau_s^2}\right) (\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz})^2 + (\sigma_s^c - \sigma_s^P) (\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}) = \sigma_s^P \sigma_s^c.$$

При этом если предел текучести на сдвиг  $\tau_s = \sqrt{\frac{\sigma_s^P \sigma_s^c}{3}}$ , то критерий Ю.И. Янга преобразуется в критерий П.А. Баландина. Этот критерий в достаточной мере не подвергался экспериментальной проверке, и не исследованы границы его применимости.

Если в условии текучести Ю.И. Янга сопротивление деформации при чистом сдвиге представить в виде

$$\tau_s = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{\sigma_s^P \sigma_s^c}{\sigma_s^P + \sigma_s^c}},$$

то получаем условие текучести (прочности) *И.Н.Миролюбова*, которое нашло экспериментальное подтверждение правомерности при испытаниях чугуновых образцов. На других материалах критерий *И.Н.Миролюбова* не проверялся.

## 2. Факторы и параметры, влияющие на величину сопротивления деформации

Из материалов, приведенных в предыдущем разделе, следует, что знание величины сопротивления деформации для конкретного сплава и при определенных условиях пластической обработки еще не гарантирует правильный учет свойств металла при сложных схемах напряженного состояния, характерных для большинства процессов обработки металлов давлением. Критерии перехода металла в пластическое состояние введены на гипотетическом уровне без строгих рекомендаций по их рациональному использованию в анализе технологий пластической обработки. Даже определившись с критерием, необходимо рассчитать практически все компоненты тензора напряжений в реальном процессе деформации, чтобы применить соответ-

ствующее условие пластичности, т.е., чтобы определиться с физическим уравнением связи параметров деформированного и напряженного состояний металла. Однако, даже используя современные пакеты прикладных программ, это нельзя выполнить, поскольку для расчета компонент тензора необходимо задать условия перехода металла в пластическое состояние. Без знания распределения в деформируемом пространстве и изменения во времени сопротивления деформации нельзя определить напряженно-деформированное состояние. А от последнего зависит распределение величины сопротивления деформации.

Определение сопротивления деформации просто, и на первый взгляд практически его найти не составляет труда. Однако схема одноосного напряжения растяжения или сжатия, т.е. схема линейного напряженного состояния, практически не реализуема. Как схема плоского напряженного состояния, так и линейного существуют лишь теоретически. Чтобы создать плоское напряженное состояние, необходимо приложить напряжение в плоскости бесконечно тонкой пластины. Соответственно реализация линейного напряженного состояния сводится к приложению осевого напряжения к стержню бесконечно малого диаметра. Поэтому любые значения напряжений одноосного растяжения или сжатия при переходе металла в пластическое состояние будут являться некоторой приближенной оценкой сопротивления металла деформации.

Используя какую-либо гипотезу перехода металла в пластическое состояние, можно заменить опыты по замеру напряжений одноосных растяжения или сжатия замером напряжения чистого сдвига. Тогда сопротивление деформации определяется либо как  $\sigma_s = 2\tau_s$ , где  $\tau_s$  – сопротивление деформации чистого сдвига, либо как  $\sigma_s = \sqrt{3}\tau_s$ . В первом случае используется гипотеза Сен-Венана-Треска, во втором – Губера-Мизеса. Мало того что сопротивления деформации, определяемые в рамках различных гипотез, существенно разнятся, определение  $\tau_s$  в опытах на чистый сдвиг затруднительно из-за неминуемого усложнения схемы напряженного состояния в любых реализациях сдвиговых деформаций.

В реальных процессах обработки металлов давлением при больших степенях деформации, осуществляемых при значительных скоростях и температурах, чаще всего выше температуры рекристаллизации, сопротивление деформации оказывается чрезвычайно сложной

функцией из-за одновременно протекающих во времени процессов упрочнения и разупрочнения. В общем виде функция сопротивления деформации представляется следующим образом [10]:

$$\sigma_s = \sigma_s(T, \varepsilon, \dot{\varepsilon}, \varepsilon(t), x),$$

где  $T$  – температура деформации;

$\varepsilon$  – степень деформации;

$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt}$  – скорость деформации,  $\text{с}^{-1}$ ;

$\varepsilon(t)$  – функция изменения степени деформации во времени;

$x$  – совокупность физико-химических свойств материала.

После дифференцирования закон изменения во времени сопротивления деформации представляется в форме (Надаи)

$$d\sigma_s = \frac{d\sigma_s}{dT} dT + \frac{\partial\sigma_s}{\partial\varepsilon} d\varepsilon + \frac{\partial\sigma_s}{\partial\dot{\varepsilon}} d\dot{\varepsilon} + \frac{\partial\sigma_s}{\partial t} dt + \frac{\partial\sigma_s}{\partial x} dx,$$

частным видом которого является уравнение Максвелла

$$\frac{d\sigma_s}{dt} = E \frac{d\varepsilon}{dt} - \frac{\sigma_s}{\tau_0}, \text{ где } E - \text{модуль Юнга первого рода; } \tau_0 - \text{постоянная}$$

времени возврата (релаксация напряжений) в процессе разупрочнения (в частности, за счет рекристаллизации).

Если для случая развития пластической деформации вместо  $E$  подставить модуль упрочнения  $D = d\sigma_s/d\varepsilon$ , то последнее уравнение преобразуется к виду

$$\frac{d\sigma_s}{d\varepsilon} = D - \eta(\sigma_s - \sigma_0),$$

где  $\eta = \frac{1}{\tau_0 \dot{\varepsilon}}$  – параметр, характеризующий усредненную скорость

релаксации за время  $\tau_0$ ;

$\sigma_0$  – сопротивление деформации в статических условиях.

Когда, в соответствии с рекомендацией А.И. Целикова, считают, что условная относительная скорость релаксации является функцией  $\eta = \eta(T, \dot{\varepsilon})$  и принимают постоянной скорость деформации  $\dot{\varepsilon}$ , то можно получить известное уравнение А.И. Целикова:

$$\sigma_s = \sigma_0 + \frac{D}{\eta} (1 - e^{-\eta\varepsilon}),$$

которое широко используется для практических расчетов величины сопротивления деформации при  $\dot{\varepsilon} = \text{const}$ , если удастся косвенным

путем определить параметры  $D$ ,  $\eta$  и  $\sigma_0$ . Это уравнение учитывает влияние на сопротивление деформации степени и скорости деформации.

Если изучается изменение сопротивления деформации в холодном или теплом состоянии, т.е. при температуре ниже температуры рекристаллизации, то в рассмотрение принимается один параметр, характеризующий степень деформации. При этом считается, что влияние скорости деформации незначительно и им можно пренебречь, хотя это правомерно далеко не во всех случаях и не для всех металлов и сплавов.

Достаточно важным параметром при определении зависимости сопротивления деформации как при холодной, так и при горячей деформации от степени деформации является форма представления оценки истинной степени деформации, которая при развитой пластической деформации определяется выражением

$$\varepsilon = \int_0^t H d\tau / \sqrt{3} \cong 0,58 \int_0^t H d\tau,$$

где  $H$  – интенсивность скоростей деформаций сдвига;

$\tau$  – текущее время;

$t$  – конечное время деформирования.

Поскольку определять истинную степень деформации в реальных процессах достаточно сложно, то прибегают к упрощенным оценочным параметрам степени деформации. При одноосном растяжении истинная степень деформации представляется выражением

$$\varepsilon = \ln \frac{l_1}{l_0} / \sqrt{3} \cong 0,58 \ln \frac{l_1}{l_0},$$

где  $l_0$  и  $l_1$  – базовая длина образца до и после растяжения соответственно.

Часто степень деформации при растяжении отождествляют с относительным удлинением  $\delta = \Delta l / l_0$ , что дает малую ошибку в оценке степени деформации только при сравнительно малой деформации. Следует учесть, что логарифмическая степень деформации в технологическом применении удобнее, чем относительная деформация, благодаря аддитивности. В расчетах суммарной степени холодной деформации возможно сложение частных логарифмических деформаций. Стандартная механическая характеристика, определяемая при испытаниях на растяжение, относительное сужение,

$\psi = \frac{F_0 - F}{F_0} \cdot 100\%$  также может рассматриваться как оценка степени деформации. В случае замеров площадей сечения образца до деформации  $F_0$  и в процессе растяжения на стадии однородной по длине деформации  $F_1$  степень деформации оценивается также логарифмической степенью  $\varepsilon = \ln \frac{F_0}{F} = \ln \frac{1}{1 - 0,01\psi}$  (если  $\psi$  выражено в процентах).

При испытаниях на сжатие могут быть достаточно реализованы схемы плоского и осесимметричного деформированного состояния.

Если плоская деформация осуществляется осадкой бесконечно длинной полосы перемещением плиты с постоянной скоростью  $V$  в направлении  $y$ , то скорость деформации

$$\xi_{yy} = \frac{\partial V_y}{\partial y} = c.$$

Тогда  $V_y = \int c dy + \varphi(y) = cy + \varphi(y)$ .

Если нижняя плита ( $y = 0$ ) неподвижна, то  $V_{y|y=0} = 0$  и  $\varphi(y) = 0$ . В то же время  $V_{y|y=h} = -V$ , где  $h$  – текущая высота осаживаемой полосы.

Тогда  $-V = ch$  и  $c = -\frac{V}{h} = \xi_{yy}$ ;  $V_y = -\frac{V}{h}y$ .  $\xi_{xx} = -\xi_{yy}$  по условиям плоской деформации. Таким образом, можно записать

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} = \frac{V}{h}; \quad V_x = \int \frac{V}{h} dx + \varphi(x); \quad V_{x|x=0} = 0; \quad \text{отсюда } \varphi(x) = 0 \text{ и } V_x = \frac{V}{h}x.$$

Скорость деформации сдвига в плоскости  $x - y$

$$\xi_{xy} = \frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial x} = 0. \quad \text{Следовательно, интенсивность скоростей деформаций}$$

сдвига  $H = 2\sqrt{\xi_{xx}^2 + \xi_{yy}^2} = 2\frac{V}{h}$ . Степень деформации сдвига

$$\Lambda = \int_0^t H d\tau. \quad \text{Можно записать } -V = \frac{dh}{d\tau}; \quad \text{отсюда } d\tau = -\frac{dh}{V}. \quad \text{Таким обра-}$$

зом

$$\Lambda = -\int_0^h 2\frac{V}{h} \cdot \frac{dh}{V} = 2 \ln h \Big|_{h_0}^h = 2 \ln \frac{h_0}{h}.$$

В рамках гипотезы Сен-Венана –Треска  $\varepsilon = \frac{\Lambda}{2} = \ln \frac{h_0}{h}$ , гипотезы

Губера –Мизеса  $\varepsilon = \frac{\Lambda}{\sqrt{3}} \approx 1,15 \ln \frac{h_0}{h}$ .

При осесимметричной осадке образца высотой  $h_0$  с постоянной скоростью  $V$  в направлении оси  $z$ , совпадающей с осью образца

$$\xi_{zz} = -\frac{V}{h}, \text{ где } h - \text{текущая высота:}$$

$$V_z = -\frac{V}{h} z; \quad \frac{\partial V_z}{\partial z} = \xi_{zz} = -\frac{V}{h}.$$

Условие несжимаемости представлено однородным дифференциальным уравнением

$$\frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{V_r}{r} = -\xi_{zz} \text{ типа } \frac{dy}{dx} + p(x)y = Q(x),$$

имеющим общее решение в виде  $y = \frac{1}{M(x)} \int Q(x)M(x)dx + f(x)$ , где

$M(x) = e^{\int p(x)dx}$  – интегрирующий множитель.

Теперь  $y = V_r$ ;  $x = r$ ;  $Q(x) = -\xi_{zz}$ ;  $p(x) = \frac{1}{r}$ ;  $M(r) = e^{\int \frac{dr}{r}} = r$ .

Таким образом,  $V_r = \frac{1}{r} \int \frac{V}{h} r dr = \frac{1}{2} \frac{V}{h} r + f(r)$ .

Поскольку  $V_{r|r=0} = 0$ , то  $f(r) = 0$  и  $V_r = \frac{1}{2} \frac{V}{h} r$ .

Компоненты тензора скоростей деформации для случая осесимметричной деформации в системе координат  $((z, r, \varphi))$  равны

$$\xi_{rr} = \frac{\partial V_r}{\partial r} = \frac{1}{2} \frac{V}{h}; \quad \xi_{\varphi\varphi} = \frac{V_r}{r} = \frac{1}{2} \frac{V}{h}; \quad \xi_{rz} = \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{\partial V_r}{\partial z} = 0.$$

Интенсивность скоростей сдвиговой деформации

$$H = 2\sqrt{\xi_{rr}^2 + \xi_{rr}\xi_{\varphi\varphi} + \xi_{\varphi\varphi}^2 + \xi_{rz}^2} = \sqrt{3} \frac{V}{h}.$$

Степень деформации сдвига

$$\Lambda = \int_0^t H d\tau = - \int_{h_0}^h \sqrt{3} \frac{V}{h} \cdot \frac{dh}{V} = \sqrt{3} \ln \frac{h_0}{h_1}.$$

В рамках гипотезы Сен-Венана –Треска  $\varepsilon = \Lambda/2 = 0,86 \ln h_0/h_1$ , а Губера –Мизеса  $\varepsilon = \Lambda/\sqrt{3} = \ln h_0/h_1$ .

При испытаниях на чистый сдвиг деформации и напряжения перехода металла в пластическое состояние определяются либо при срезе (сдвиг одной части материала относительно другой под действием касательных напряжений), либо при кручении.

Деформация относительного сдвига при кручении оценивается величиной

$$\gamma = \operatorname{tg} \beta = \frac{\varphi}{l} r,$$

где  $\varphi$  – угол взаимного разворота сечений круглого образца, отстоящих друг от друга на расстоянии  $l$ ;

$r$  – радиус сечения образца;

$\beta$  – относительный угол сдвига на расстоянии  $r$  от оси образца.

Истинная главная деформация в случае деформирования кручением может быть определена по формуле [11]:  $\varepsilon = \ln \left( 1 + \frac{\gamma}{2} \right)$ .

Из этой формулы следует однозначная зависимость между истинной и относительной степенями деформации.

Степень деформации является важным параметром, определяющим сопротивление металла пластическому формоизменению, особенно при холодной и теплой деформациях, когда степень упрочнения металла почти полностью определяется величиной степени деформации. При горячей деформации  $\varepsilon$  оказывает влияние на процессы динамического разупрочнения, а также на деформационный разогрев и на протекание процессов фазовых превращений и диффузии.

Деформация в пластическом состоянии связана с возникновением, формированием и перемещением дислокаций, которые возникают при кристаллизации под действием температурных напряжений при неоднородных температурных полях, при внедрении посторонних атомов, при слиянии разнородных дефектов кристаллического строения, при деформации. Дислокации перемещаются под действием касательных напряжений в плоскостях размещения дислокаций. При этом сдвигаются противоположащие области кристаллической решетки. Сдвиг (скольжение) проходит преимущественно в плоскостях наиболее плотной упаковки атомов. Чем больше систем скольжения имеет кристаллическая решетка, тем лучше деформируется металл. При пластической деформации образуется большое количество дислокаций, которые при скольжении выходят к границам зерен и «застывают» в местах искажения кристаллической решетки, что приво-



дит к необходимости повышать величину касательных напряжений, чтобы продолжить процесс деформирования [12].

Рост напряжения с увеличением степени деформации называется упрочнением или наклепом. При деформации поликристаллического тела плоскости скольжения и направления скольжения в каждом кристаллите (зерне или субзерне) занимают случайное положение относительно направления действия касательных напряжений. Поэтому не все кристаллиты в равной степени принимают участие в деформации. Холодная или теплая деформация может продолжаться до тех пор, пока не начнется процесс формирования макротрещин в местах скопления дислокаций. Пластическая деформация может быть возобновлена после термообработки с перестройкой зеренной структуры и снятия дислокационных барьеров (рекристаллизация). Этот процесс называют статическим разупрочнением металла.

Упрочнение металлов с ГЦК-решеткой, в частности алюминиевых сплавов, проходит три стадии [13]. Первая – стадия легкого скольжения – определяется малым линейным упрочнением. Вторая стадия характеризуется упрочнением, в десятки раз превышающим упрочнение на первой стадии. Третьей стадии присуще уменьшение степени упрочнения с ростом деформации. Пластическая деформация гексагональных металлов осуществляется скольжением по пирамидальным и призматическим плоскостям, а также двойникованием в зависимости от ориентации кристаллов [14]. Поэтому в зависимости от ориентировки кристаллитов на диаграмме  $\sigma_s(\varepsilon)$  протяженность стадий может быть различной. Представителем металлов с ГПУ-решеткой является магний и его малолегированные сплавы. У металлов с кристаллами, ориентированными для единичного скольжения на кривых  $\sigma_s - \varepsilon$  наблюдаются все три стадии, как у металлов с ГЦК-структурой. С приближением ориентировки для базисного скольжения первая стадия чаще всего отсутствует. Также наблюдается уменьшение или исчезновение этой стадии у металлов с ГПУ-структурой с ориентировками для двойного скольжения.

Повышение температуры обычно способствует уменьшению сопротивления деформации, так как растет энергия теплового движения атомов и создаются условия для одновременного действия наиболее эффективных механизмов пластической деформации. Например [13], с повышением температуры у алюминия и магния добавляются новые плоскости и направления скольжения, что значительно повышает способность этих металлов к пластической деформации. При темпе-

ратуре 450...500<sup>0</sup>С становится возможным скольжение у кристаллов алюминия по плоскостям октаэдра и куба. При более низких температурах скольжение по плоскости октаэдра затрудняется и деформируемость алюминиевых поликристаллов заметно снижается.

Пластическая деформация при высоких температурах протекает значительно сложнее, чем при низких, и характеризуется следующими основными процессами:

- физико-химическими (в частности фазовыми превращениями);
- взаимным смещением зерен;
- образованием субзерен;
- миграцией границ зерен;
- возвратом и рекристаллизацией;
- образованием и развитием несплошностей и их залечиванием;
- неоднородным внутризеренным скольжением;
- скольжением в двойниковых зонах.

С ростом температуры деформации не только снижается уровень значений сопротивления деформации, но изменяется характер зависимости  $\sigma_s$  от  $\varepsilon$ . У чистого алюминия с ростом температуры снижается коэффициент деформационного упрочнения. У кривых  $\sigma_s - \varepsilon$  появляется тенденция к выходу  $\sigma_s$  на установившуюся стадию, что указывает на интенсивность прохождения в металле динамического разупрочнения [14].

Поскольку алюминий разупрочняется по процессу динамического возврата (полигонизация), то с повышением температуры все более четко проявляется стабилизация  $\sigma_s$ .

Влияние температуры на сопротивление деформации сильнее проявляется у сплавов, чем у чистых металлов. Это обусловлено тем, что примеси в большей степени упрочняют границы зерен, чем само зерно. При этом возрастает роль барьерного эффекта, затрудняется скольжение, что и повышает эффект упрочнения [14].

Следует признать, что часто употребляемое деление процессов деформации на холодные, теплые и горячие условно. Учитывая, что переход от одного температурного диапазона к другому определяется не только температурой, но и скоростью деформации, целесообразно рассматривать коллективное воздействие на  $\sigma_s$  всех параметров.

Скорость деформации  $\dot{\varepsilon} = d\varepsilon/dt$  при горячем пластическом формоизменении является наиболее значимым параметром, определяющим величину сопротивления деформации. Как правило, с ростом  $\dot{\varepsilon}$

уменьшается время на протекание процессов динамического разупрочнения и повышается уровень значений  $\sigma_s$ . Изменяется с увеличением скорости деформации и характер зависимостей  $\sigma_s(\varepsilon)$ . Скоростное упрочнение более заметно у легкоплавких и чистых металлов. Влияние  $\dot{\varepsilon}$  на  $\sigma_s$  уменьшается с увеличением содержания легколигирующих элементов примесей. С одной стороны, примеси ослабляют влияние скорости деформации из-за затруднения динамических полигонизации и рекристаллизации, с другой – примеси и легирующие способствуют снижению температуры плавления сплава и таким образом усиливают влияние  $\dot{\varepsilon}$  на  $\sigma_s$  [14]. Влияние скорости деформации на  $\sigma_s$  металлов зависит от степени и температуры деформации. Увеличение степени деформации при высоких температурах приводит к росту скоростного упрочнения. При сравнительно низких температурах  $\varepsilon$  оказывает слабое влияние на зависимость  $\sigma_s(\varepsilon)$ .

Хотя скоростное упрочнение носит достаточно общий характер, известны [15] примеры аномального уменьшения  $\sigma_s$  с ростом  $\dot{\varepsilon}$ . Это связывают с процессами деформационного старения, фазовыми и аллотропическими превращениями, деформационным разогревом, изменением механизма пластической деформации, ускорением процессов динамического разупрочнения при высоких скоростях деформации.

Чаще всего скоростное упрочнение рассматривается при горячей деформации металлов и сплавов. Однако у некоторых сплавов с достаточно высокой температурой возврата и рекристаллизации скорость деформации оказывает влияние на  $\sigma_s$  и при комнатной температуре, на что указывается многими исследователями, в частности Л.Д. Соколовым [16]. Для объяснения этого явления предлагается две гипотезы. В первом варианте «принимается, что упругая деформация распространяется в твердой среде со скоростью звука; скорость распространения пластической деформации значительно меньше скорости распространения упругой. Следовательно, при нагружении тела выше предела упругости величина пластической деформации должна определяться скоростью этого нагружения: чем выше скорость нагружения, тем меньше времени для протекания пластической деформации и тем выше напряжение, при котором возникает переход из упругой деформации в пластическую». По второй гипотезе скоростное упрочнение даже в холодном состоянии возникает из-за одновременного протекания процессов степенного упрочнения и динамиче-

ского разупрочнения (самодиффузия, поперечное скольжение и т.п.). В работе [16] по отношению алюминиевых сплавов приводятся литературные данные, согласно которым при повышении скорости деформации в 150 раз  $\sigma_s$  увеличивается в среднем в 1,05 раза. Следовательно, проблема влияния скорости деформации на  $\sigma_s$  у алюминиевых сплавов не столь актуальна.

Кроме рассмотренных параметров – степень, скорость и температура деформации – на величину сопротивления деформации оказывают влияние следующие факторы [12, 14]:

- физико-химические и структурные характеристики металла;
- легирующие элементы и примеси;
- размер исходного зерна;
- исходное состояние металла и история его обработки;
- внешнее гидростатическое напряжение;
- скорость нагрева при проведении испытаний;
- способ нагрева испытываемых образцов;
- местоположение образцов в заготовке;
- воздействие на металл высоких энергий и ультразвука;
- электропластические эффекты;
- воздействие окружающей среды;
- метод определения сопротивления деформации;
- цикличность и скважность нагружения.

Наличие такого большого количества факторов, оказывающих влияние на величину сопротивления деформации, объясняет явно недостаточную обеспеченность технологов информацией о свойствах конкретных металлов и сплавов, несмотря на достаточно большое количество опубликованных результатов исследования зависимости сопротивления деформации от основных влияющих факторов. Применение различных методик определения величины сопротивления особенно горячей деформации порождает большой разброс значений  $\sigma_s$  для одних и тех же марок сплавов. Трудно определить правомерность практического использования приведенных данных из-за отсутствия полной характеристики исходной заготовки, истории ее обработки, ориентировки и местоположения испытываемых образцов и так далее в соответствии с приведенным выше перечнем факторов [10].

### 3. Экспериментальное определение сопротивления деформации металлов и сплавов

#### 3.1. Методы растяжения

При определении сопротивления металла деформации в холодном состоянии, т.е. при определении интенсивности деформационного, а иногда и скоростного упрочнения, и для построения кривых упрочнения в координатах  $\sigma_s$ - $\varepsilon$ , или  $\sigma_{02}$ - $\varepsilon$ , или  $\sigma_s$ - $\psi$ , или  $\sigma_s$ - $\delta$  широко используются стандартное испытание на растяжение и стандартные образцы в соответствии с ГОСТ 1497-73 [2, 17]. Стандарт устанавливает методы статических испытаний на растяжение для определения при температуре  $20_{-5}^{+100}$ °С пределов пропорциональности, упругости, текучести (условного и физического), временного сопротивления разрыву, истинного сопротивления разрыву, относительного удлинения и относительного сужения после разрыва.

*Предел пропорциональности (условный)  $\sigma_{\text{пц}}$*  – напряжение, при котором отклонение от линейной зависимости между нагрузкой и удлинением достигает такой величины, при которой тангенс угла наклона, образованного касательной к кривой деформации  $P - \Delta l$  ( $P$  – осевое усилие,  $\Delta l$  – абсолютное удлинение образца на базовой длине) в точке  $P_{\text{пц}}$  с осью нагружения, увеличивается на 50 % своего значения на линейном упругом участке;  $\sigma_{\text{пц}} = P_{\text{пц}} / F_0$ , где  $F_0$  – исходная площадь сечения образца.

*Предел упругости  $\sigma_{0,05}$*  – напряжение, при котором остаточное удлинение достигает 0,05 % от длины  $l_0$  базового участка образца  $\sigma_{0,05} = P_{0,05} / F_0$ .

*Предел текучести (физический)  $\sigma_T$*  – наименьшее напряжение, при котором образец деформируется без заметного увеличения растягивающей нагрузки  $\sigma_T = P_T / F_0$ .

*Предел текучести (условный)  $\sigma_{0,2}$*  – напряжение, при котором остаточное удлинение (после снятия нагрузки) достигает 0,2 % от начальной базовой длины  $l_0$ :  $\sigma_{0,2} = P_{0,2} / F_0$ .

Следует иметь в виду, что 0,2 % остаточной деформации оговаривается ГОСТ 1497-73 и некоторыми другими стандартами. Можно встретить стандарты на испытание металлов на растяжение, в кото-

рых устанавливаются иные значения остаточной деформации: 0,05 %; 0,3 %; 0,5 % и т.д.

*Предел прочности (временное сопротивление разрыву)  $\sigma_B$*  является наиболее распространенным показателем прочности металла и представляет собой напряжение в образце, отнесенное к исходной площади сечения образца и соответствующее наибольшей нагрузке, предшествующей разрушению или локализации пластической деформации (образование шейки):  $\sigma_B = P_B / F_0$ .

*Истинное сопротивление разрыву  $S_K$*  – напряжение, определяемое отношением нагрузки  $P_K$  в момент разрыва к площади поперечного сечения образца в месте разрыва  $F_K$ ;  $S_K = P_K / F_K$ .

*Сопротивление деформации (истинное напряжение)  $\sigma_s$*  (иногда используется обозначение  $\sigma$ ) – напряжение, определяемое отношением текущего усилия растяжения  $P_i$  к площади поперечного сечения образца  $F_i$  до момента локализации деформации;  $\sigma_s = P_i / F_i$ .

*Относительное удлинение  $\delta$*  – отношение абсолютного остаточного удлинения при разрыве к базовой длине образца, выраженное в процентах:  $\delta = \frac{l - l_0}{l_0}$ .

*Относительное сужение  $\psi$*  – отношение уменьшения площади поперечного сечения образца после разрыва к первоначальной площади поперечного сечения, выраженное в процентах:  $\psi = \frac{F_0 - F_K}{F_0}$ .

Положение характерных точек на типовой диаграмме растяжения показано на рис. 2.

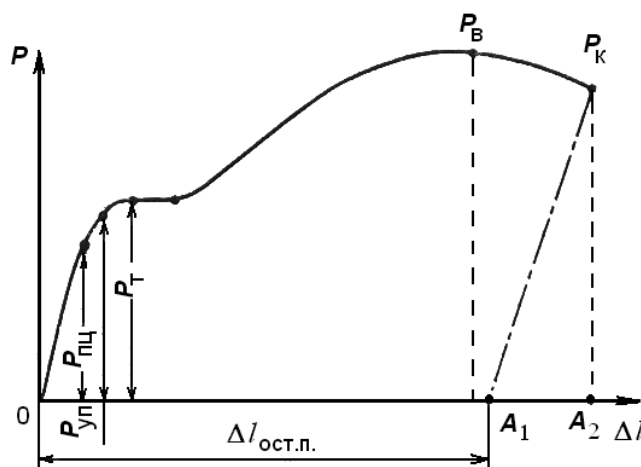


Рис. 2. Характерные точки типовой диаграммы растяжения

На показанной диаграмме растяжения отсутствует точка  $P_{02}$ , поскольку на диаграмме этого типа имеется так называемая площадка текучести, т.е. участок диаграммы, на котором пластическая деформация развивается при незначительном изменении нагрузки. Предел текучести  $\sigma_T$  соответствует уровню этой площадки текучести. В большинстве случаев растяжения образцов металлов и сплавов площадка текучести на диаграмме отсутствует, и предел текучести оценивают величиной  $\sigma_{02}$ . Для этого на оси абсцисс диаграммы растяжения откладывают отрезок длиной  $\Delta l_{02} = 0,002l_0$  и из конца этого отрезка проводят прямую, параллельную участку диаграммы, соответствующему упругой деформации, до пересечения с кривой диаграммы, получая, таким образом, точку  $P_{02}$ .

Полученная диаграмма растяжения перестраивается в координатах напряжение–относительное удлинение, при этом  $\sigma = P/F_0$  и  $\varepsilon = \Delta l/l_0$ . Если по оси ординат откладывается истинное напряжение растяжения  $\sigma = P/F$ , где  $F$  – текущее значение площади поперечного сечения образца, то полученную зависимость называют диаграммой истинных напряжений.

Поскольку многие механические характеристики, определяемые при испытании на растяжение, зависят от места локализации деформации, стандарт регламентирует относительную длину образцов. Последние подразделяются на длинные, или десятикратные, с  $l_0 = 11,3\sqrt{F_0}$  ( $l_0 = 10d$ ) и короткие с  $l_0 = 5,65\sqrt{F_0}$  ( $l_0 = 5d$ ), где  $d$  – диаметр рабочей части круглого в сечении образца. Чем короче испытываемые образцы, тем выше получается среднее (в статистической выборке) относительное удлинение.

В качестве испытательных машин применяются разрывные и универсальные испытательные машины всех систем при условии соответственно их требованиям ГОСТ 7855-74. В качестве примера на рис. 3 показана разрывная испытательная машина ИМ-4Р.

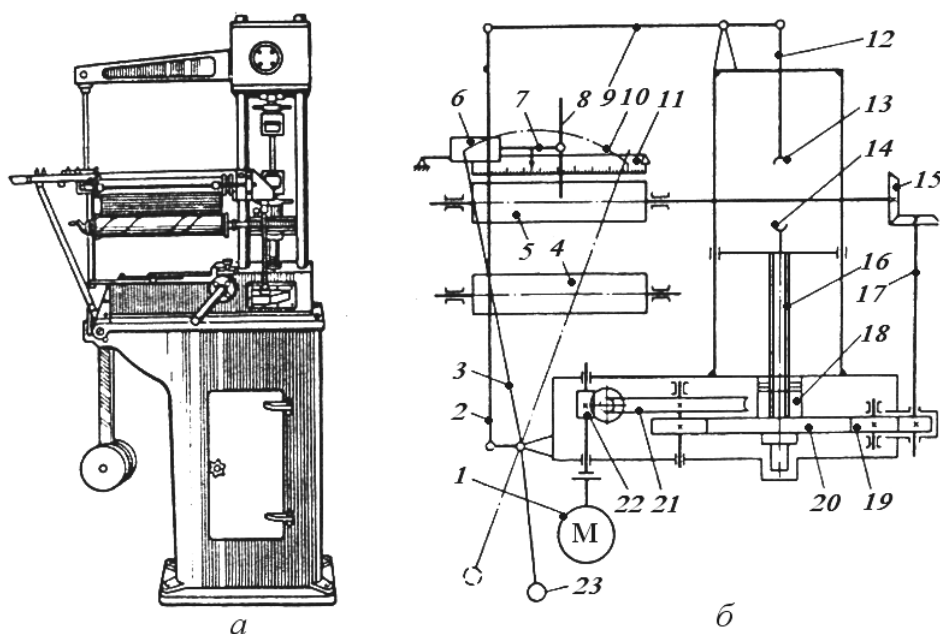


Рис. 3. Машина для испытаний на растяжение ИМ-4Р:  
*а* – общий вид; *б* – кинематическая схема машины

Современные испытательные машины, как правило, снабжаются встроенными муфельными нагревательными устройствами и программно управляемыми приводами, что позволяет их использовать при определении сопротивления горячей деформации, когда требуется стабилизация температурно-скоростных режимов деформирования.

Когда строятся кривые упрочнения металла в холодном и теплом состояниях, то сопротивление деформации, как правило, оценивается величиной либо предела текучести  $\sigma_T$ , либо условного предела текучести  $\sigma_{0.2}$ . При растяжении трудно получить значительные степени деформации из-за раннего образования шейки и, следовательно, нарушения основного условия определения сопротивления деформации – одноосного (линейного) напряженного состояния. Поэтому большие деформации достигают либо прокаткой, либо волочением в холодном состоянии. Схема накопления степени пластической деформации оказывает существенное влияние на получаемые зависимости  $\sigma_s$  от  $\varepsilon$ . Холоднотянутые прутки, используемые для изготовления образцов на растяжение с различной исходной степенью накопленной деформации, всегда обладают осевой текстурой, которая мало зависит от дробности деформации при многопроходном волочении. Поэтому результаты описания степенного упрочнения более стабильны и могут использоваться при технологических расчетах



любых способов волочения. При волочении степень деформации условно принимается однородной и оценивается величиной  $\varepsilon_i = 2 \ln d_{i-1}/d_i$ . Кривые упрочнения также строятся в зависимости от логарифмической степени деформации.

При прокатке листов в холодном состоянии текстурирование листа является более сложным процессом и формируемая при прокатке анизотропия механических свойств и, в частности, сопротивления деформации при прочих равных условиях зависят от дробности деформации. Естественно, при изготовлении образцов на испытание растяжением необходим учет ориентировки их осей в плоскости листа. При прокатке накапливаемую степень деформации оценивают величиной  $\varepsilon_i = \ln h_{i-1}/h_i$  и суммируют по проходам.

На этапе равномерного удлинения до момента локализации деформации возможно построение части кривой упрочнения в координатах  $\sigma_s$ - $\varepsilon$ . Контролируя условия равномерности удлинения на базовой длине, определяют истинные напряжений растяжения  $\sigma = P/F$ , принимаемые за оценку сопротивления деформации ( $\sigma = \sigma_s$ ), и определяют логарифмическую степень деформации по текущим значениям относительных удлинения и сужения  $\varepsilon_i = \ln(1 + \delta_i)$ ;  $\varepsilon_i = \ln \frac{1}{1 - \psi_i}$ .

Характеристиками предельной равномерной деформации при растяжении принято считать равномерное удлинение  $\delta_B$  и предельное равномерное сужение  $\psi_B$  [18]. Эти характеристики взаимосвязаны:

$$\delta_B = \frac{\psi_B}{1 - \psi_B}; \quad \psi_B = \frac{\delta_B}{1 + \delta_B}.$$

Предельное равномерное удлинение проще определять по максимуму первичной диаграммы растяжения, а предельное равномерное сужение по сечению разрушенного образца, расположенного за пределами шейки. Но регистрация деформации, соответствующей максимуму первичной диаграммы растяжения, часто бывает затруднена из-за пологой линии максимальной нагрузки для пластичных материалов. В этом состоит основная трудность определения  $\delta_B$  по диаграмме растяжения и связанные с ней погрешности измерения. Вместе с тем рабочая часть разорванных образцов, расположенная вне шейки, имеет, как правило, переменное сечение, за счет чего возникают трудности и возможные погрешности при определении максимального равномерного сужения  $\psi_B$ . Самую большую неопределенность при этом вносит зона перехода равномерной

деформации в сосредоточенную. Результаты экспериментов, выполненных автором [18], показали, что переход равномерной деформации в сосредоточенную происходит не мгновенно, а в течение некоторого промежутка времени, определяющего размер этой зоны. В пределах переходной зоны могут возникать и перемещаться вдоль рабочей длины образца локализации пластической деформации еще до возникновения явной шейки. Расположение переходной зоны на диаграмме растяжения относительно  $P_B$  является характерной особенностью определенных материалов и, в частности, технических марок алюминия. Учитывая особенности перехода равномерной деформации в сосредоточенную, для определения  $\delta_B$  по диаграмме растяжения в работе [18] предложена следующая методика. На диаграмме растяжения  $P-\Delta l$  на уровне  $0,99 P_B$  проводится горизонталь, отсекающая участок с максимальной нагрузкой. Затем находится середина этого участка и соответствующее ей остаточное абсолютное удлинение  $\Delta l_B$ , как это показано рис. 4 [18]. Предельное относительное равномерное удлинение определяется как отношение  $\delta_B = \Delta l_B / l_0$ .

На основании теоретических рассуждений С.И. Губкиным было предложено уравнение, предназначенное для построения кривых упрочнения отоженных металлов для степеней деформации, соответствующих равномерному удлинению и началу местного деформи-

рования [11]:

$$\sigma_s = \sigma_{ш} \left( \frac{\psi_x}{\psi} \right)^{\frac{\psi_{ш}}{1-\psi_{ш}}},$$

где  $\sigma_{ш} = P/F_{ш}$  – напряжение в момент появления шейки;

$$\psi_x = \frac{F_0 - F_x}{F_0} \text{ – текущее относительное сужение;}$$

$$\psi_{ш} = \frac{F_0 - F_{ш}}{F_0} \text{ – относительное сужение в момент появления}$$

шейки;

$F_{ш}$  и  $F_x$  – площадь поперечного сечения соответственно в момент появления шейки и в произвольный момент.

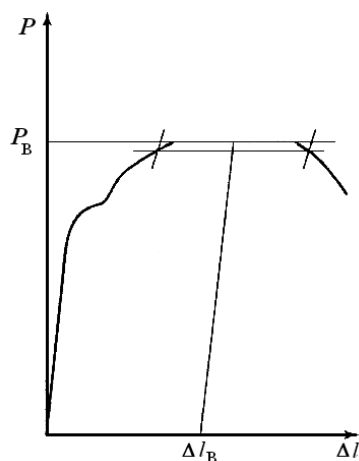


Рис. 4. Пример определения абсолютного предельного равномерного остаточного удлинения по машинной диаграмме растяжения

Экспериментальная проверка этого уравнения показывает, что наибольшее расхождение между экспериментальными и теоретическими значениями напряжения текучести приходится на область малых деформаций. Правда, при деформациях до момента образования шейки нет нужды использовать это уравнение, поскольку часть диаграммы истинных напряжений растяжения дает возможность оценить изменение сопротивления деформации при малых деформациях.

Достаточно надежным при построении кривых деформационного упрочнения по результатам испытаний на растяжение считается теоретическое уравнение П.С. Соколова:

$$\sigma_s = \sigma_B \left[ 1 + \left( 1 - \exp \frac{e_p - e_2}{2} \right) \right],$$

где  $\sigma_B = P_B / F$  – истинный предел прочности;

$$e_p = 2 \ln \frac{d_0}{d_p}; \quad e_2 = 2 \ln \frac{d_0}{d};$$

$d_0$  – исходный диаметр образца;

$d_p$  – диаметр образца в момент начала локализации деформации;

$d$  – текущий диаметр образца.

Недостаток метода построения кривых упрочнения по результатам испытаний на растяжение состоит в невозможности непосредственно определить сопротивление деформации при деформациях выше, чем они определены образованием шейки. Применение расчетных формул позволяет строить кривую упрочнения лишь для степеней деформации, соответствующих моменту разрыва. Для больших  $\varepsilon$

необходима далеко не всегда правомерная экстраполяция. Таким образом, следует признать, что надежные результаты при определении  $\sigma_s$  методом испытания на растяжение обеспечиваются лишь при  $\varepsilon$  до 0,2...0,3.

Результаты испытаний на растяжение используются в расчетных методах определения сопротивления деформации. В частности, авторы [23] предлагают для сплавов алюминия АМц, АМг2 и Д1 использовать формулу  $\sigma_s = \sigma_T + 0,7\varepsilon^{0,6}$ , где  $\varepsilon = \Delta h/h_0$  – обжатие при прокатке, выраженное в процентах.

Кривые упрочнения, построенные по результатам расчетных методов, не отвечают всем требованиям точности. Однако если результаты используются для оценки сопротивления металла деформации именно после прокатки и испытания на растяжение проводятся в холодном состоянии, а образцы вырезают в направлении прокатки, то результатам определения  $\sigma_s$  вполне можно доверять.

### 3.2. Методы испытаний на сжатие

Определение сопротивления деформации методом сжатия (осадки) цилиндрических образцов значительно расширяет интервалы варьирования влияющих факторов, в частности степени и скорости деформации. С точки зрения стабилизации температурного режима существуют те же проблемы, что и при испытаниях на растяжение. В то же время при осадке с высокой степенью деформации практически невозможно сохранить однородность деформации в объеме образца из-за контактного трения.

Испытание на сжатие является наиболее простым из всех видов механических испытаний. По схеме напряженного состояния оно подходит к большинству процессов ОМД, где преобладают сжимающие напряжения [2]. Испытание проводят либо на прессах, либо на испытательных машинах, которые приспособлены как для растяжения, так и для сжатия. Машины оснащаются преобразователями силы и перемещения для привода самописца при регистрации диаграммы нагружения, позволяющей определить модуль упругости  $E^c$ , предел пропорциональности  $\sigma_{пц}^c$ , предел упругости  $\sigma_{0,05}^c$ , физический ( $\sigma_T^c$ ) и условный ( $\sigma_{0,2}^c$ ) пределы текучести, а также предел прочности при сжатии  $\sigma_B^c$ . Испытание на сжатие проводится по ГОСТ 25.503-80.

Результаты испытания зависят от формы и размеров образцов. Для исключения потери устойчивости образца при его осадке ограничивают отношение высоты к диаметру величиной 2,5. Используются образцы цилиндрической формы либо с гладкими торцами, либо с торцевыми выточками. При испытании необходимо контролировать соблюдение одноосного сжатия, т.е. отсутствие бочкообразования и вогнутости боковой поверхности.

При испытании на сжатие рассматриваются следующие параметры и определяются следующие характеристики:

- исходная высота образца  $h_0$ ;
- текущая (рабочая) высота образца  $h = h_0(1 - \varepsilon)$ , если степень деформации оценивается величиной относительной деформации  $\varepsilon = \Delta h / h_0$ , или  $h = h_0 e^{-\varepsilon}$ , если  $\varepsilon = \ln h_0 / h$ ;

- конечная расчетная высота образца  $h_k$  после испытания до заданной деформации или до разрушения;

- начальный диаметр образца  $d_0$ ;

- текущий диаметр при равномерной осадке (без бочкообразования)

$$d = d_0 \sqrt{\frac{h_0}{h}} = d_0 \sqrt{e^{\varepsilon}}, \quad \text{если} \quad \varepsilon = \ln h_0 / h, \quad \text{или} \quad d = d_0 \sqrt{\frac{1}{1 - \varepsilon}}, \quad \text{если} \quad \varepsilon = \frac{h_0 - h}{h_0};$$

- конечный диаметр образца  $d_k$  после заданной деформации или в момент разрушения;

- начальная, текущая и конечная площади поперечного сечения  $F_0$ ,

$$F = \frac{d_0^2}{4} \cdot \frac{h_0}{h} = 0,25 d_0^2 e^{\varepsilon} \quad (\varepsilon = \ln h_0 / h), \quad \text{или} \quad F = \frac{d_0^2}{4} \cdot \frac{1}{1 - \varepsilon} \quad (\varepsilon = \Delta h / h_0),$$

и  $F_k$ ;

- осевая сжимающая нагрузка  $P^c$ ;

- условное номинальное напряжение сжатия  $\sigma = P^c / F_0$ ;

- напряжение течения (сопротивление металла деформации) – напряжение, превышающее предел текучести, определяемое отношением нагрузки к действительной для данного момента испытания площади поперечного сечения  $\sigma_s = P^c / F$ ;

- модуль упругости при сжатии  $E^c$ ;

- предел пропорциональности при сжатии  $\sigma_{\text{пл}}^c = P_{\text{пл}}^c / F_0$  – напряжение, при котором отклонение от линейной зависимости между нагрузкой и абсолютным укорочением образца достигает такой величины, что тангенс угла наклона, образованного касательной к диаграмме  $P^c - \Delta h$  в точке  $P_{\text{пл}}^c$  с осью нагрузок, увеличивается на 50 % своего значения на линейном упругом участке;
- предел упругости при сжатии  $\sigma_{0,05}^c$  – напряжение, при котором носительная остаточная деформация (укорочение) образца достигает 0,05 % от  $h_0$ ,  $\sigma_{0,05}^c = P_{0,05}^c / F_0$ ;
- физический предел текучести  $\sigma_T^c = P_T / F_0$  – наименьшее напряжение, при котором образец деформируется пластически без заметного увеличения нагрузки;
- условный предел текучести при сжатии  $\sigma_{02}^c = P_{02} / F_0$  – напряжение, при котором относительная остаточная деформация образца достигает 0,2 % от  $h_0$ ;
- предел прочности при сжатии  $\sigma_B^c = P_{\text{max}}^c / F_0$  – наибольшее напряжение перед разрушением образца, если разрушение возможно при заданной степени деформации.

Истинные напряжения при сжатии  $\sigma = P/F$  меньше условных, в отличие от испытаний на растяжение, так как нагрузка относится к большей площади поперечного сечения.

Диаграммы  $\sigma - \varepsilon$  при сжатии пластичных и хрупких материалов существенно различаются. Первоначально диаграмма сжатия пластичного материала подобна диаграмме растяжения. Возможно появление площадки текучести. Однако временное сопротивление при сжатии чаще всего можно определить условно, так как даже значительные деформации (приводящие к расплющиванию образца) могут не вызвать разрушения и нагрузка продолжает непрерывно нарастать, в пределе до бесконечности. Хрупкие материалы при сжатии ведут себя иначе – расплющивание и рост нагрузки не наблюдаются, а разрушение происходит при достаточно малых деформациях. У хрупких материалов сопротивление сжатию значительно выше, чем сопротивление растяжению.

При испытании коротких образцов силы трения на торцевых поверхностях образца влияют на характер формоизменения и на результаты определения величины сопротивления деформации.

В литературе описываются различные методы проведения испытаний на сжатие [11]. Для определения напряжения текучести, например, тонкого листового материала используют способ осаживания специально набранной стопки листов с коническими выточками. Пакетировку осуществляют набором стопки заготовок и обрабатыванием по диаметру. Далее под прессом выравнивают прилегающие поверхности листов, при этом нагрузка составляет около 80 % от предела текучести. В стопке выполняют три продольных паза вдоль образующей цилиндра. Пазы заполняют припоем, после чего листы оказываются достаточно прочно склеенными. После этого обрабатывают торцы. Для центровки образцов в центре приспособления для осадки в торцы их вставляют штифты. Образцы имеют отношение  $d_0/h_0=1,5$  и относительный угол конуса, равный  $3^0$ . При логарифмических деформациях до 0,4...0,5 этот способ обеспечивает одноосную деформацию. По результатам такого испытания строится кривая упрочнения листового материала. Учитывая вполне вероятную анизотропию катаных листов, в результате такого испытания определяют сопротивление деформации в направлении толщины листов.

Широко распространен способ продавливания листового металла двумя плоскими бойками с хорошо обработанной рабочей поверхностью. Бойки, как правило, твердосплавные, поэтому способ применим для высокопрочных металлов и сплавов. Предполагается, что материал ненагруженной части бруска во время сжатия препятствует распространению продольных пластических деформаций. Деформация происходит лишь в поперечном направлении, т.е. фактически реализуется одноосное сжатие. Считается, что этот способ построения кривых упрочнения дает достаточно точные значения для многих производственных процессов. Экспериментально установлено, что при  $\delta/b=1/n$ , где  $\delta$  – толщина полосы,  $b$  – ширина бойков,  $n$  – любое положительное целое число, среднее давление на деформируемой поверхности может быть равным напряжению текучести максимум на 4 %.

Следует признать, что этот метод всегда дает завышенные значения напряжения текучести, что определяется внешним трением, а также неравномерностью деформации на границах с жесткими зонами.

При испытании цилиндрических образцов по методу Зибеля [12] рабочие бойки и торцевые поверхности образцов выполняют слабо-

коническими. Гартпер Г. распространил этот метод и осадку образцов в горячем состоянии. Возникающие за счет конусности радиальные напряжения должны быть достаточными для уравнивания напряжений трения. При угле конусности  $\alpha = \arctg \mu$ , где  $\mu$  – коэффициент трения, бочкообразование не наблюдается, и деформацию при определении  $\sigma_s$  считают однородной. При удовлетворительной смазке  $\alpha = 3 \dots 6^\circ$ . Если трение нестабильно в процессе осадки, особенно горячей или даже теплой, избежать бочкообразования при больших степенях деформации не удастся. Цилиндрическая форма боковой поверхности чаще всего сохраняется лишь до  $\varepsilon = 0,45$ . Применение бойков с малым  $\alpha$  снижает погрешности при определении сопротивления деформации. В общем случае при испытаниях по методу Зибеля значения  $\sigma_s$  получаются заниженными.

Известен [21] метод определения сопротивления деформации путем замера среднего контактного давления при осадке полых образцов с торцевыми коническими выточками. Высота образцов  $h_0 = (1,0 \dots 1,5)d_0$ , а отношение внутреннего диаметра к наружному  $d/d_0 \approx 0,3$ . Образцы сохраняют цилиндрическую форму до логарифмических деформаций  $0,8 \dots 0,9$ . Метод может быть рекомендован для анализа величины  $\sigma_s$  на трубах; изготовление же трубчатых образцов в иных случаях достаточно затруднительно с сохранением высокой степени коаксиальности.

Предложенный Тейлором и применявшийся П. Бриджменом метод осадки цилиндрических образцов с их обтачиванием после каждого очередного этапа нагружения [11] не устраняет влияния трения на каждой ступени осадки, а восстановление цилиндрической формы лишь упрощает процедуру замеров и определение среднего осевого напряжения при осадке. В дальнейшем метод не получил распространения из-за трудоемкости экспериментов, связанной с необходимостью механической обработки. Кроме того, промежуточная проточка создает поверхностный наклеп металла, что не может не сказаться на результатах замера сопротивления деформации.

Представляет практический интерес метод осадки цилиндрических образцов с различным отношением  $d_0/h_0$ , подробно описанный в работе [11] и разработанный еще в сороковых годах прошлого столетия В.Д. Кузнецовым. Сущность метода состоит в последовательной осадке до различных степеней деформации образцов с различным соотношением  $d_0/h_0$  (принимается количество образцов с различным



$d_0/h_0$  не менее трех, чтобы выявить нелинейный характер определяемых зависимостей). По результатам экспериментов на осадку строится график зависимостей напряжения осадки  $p = \frac{4P}{\pi d_0^2 \frac{h_0}{h}}$ ,

где  $P$  – сила осадки;  $h$  – конечная высота образца при осадке от степени деформации  $\varepsilon = \frac{h_0 - h}{h_0}$  или  $\varepsilon = \ln \frac{h_0}{h}$  при фиксированных значениях  $d_0/h_0$ . Получаемые при этом кривые отражают истинное напряжение текучести совместно с сопротивлением, вызванным влиянием контактного трения. Для исключения этого влияния координаты точек, соответствующие одной степени деформации и различным  $d_0/h_0$ , переносят на график, строящийся в координатах  $p - d/h$ , причем текущие значения  $d/h$  находятся из уравнения

$$\frac{d}{h} = \frac{d_0}{h_0(1 - \varepsilon)^{1.5}}.$$

Через полученный массив точек на графике  $p - d/h$  проводится прямая или экспоненциальная кривая, характеризующая изменение напряжения осадки с ростом отношения  $d/h$ . Путем экстраполяции получают значения удельных давлений при  $d/h = 0$ , которые рассматриваются как величины сопротивления деформации.

В работах Л.А. Шофман, и в частности в [22], рекомендуется приемлемый интервал отношений  $d_0/h_0$  от 5 до 1,5. При  $d_0/h_0 < 1,5$  существенно искажается цилиндрическая форма образца из-за влияния контактного трения. Качество методики повышается при использовании образцов с торцевыми выточками.

Экспериментально установлено, что осадка образцов с различными  $d_0/h_0$  вполне может использоваться при построении кривых упрочнения металла, как в холодном, так и в горячем состояниях, если удачна экстраполяция функции  $p = p(d/h)$ . Замена при экстраполяции кривой на прямую порождает занижение значений  $\sigma_s$ . Ошибка растет с увеличением деформации и может составлять 30 % при  $\varepsilon = 0,6$ . Поэтому метод может быть рекомендован для сравнительно небольших степеней деформации [11].

В широком диапазоне изменения  $\varepsilon$  при осадке трудно избежать неравномерности деформации даже при использовании полирован-

ных бойков и эффективных смазок, особенно в условиях испытаний при высоких температурах. С целью устранения бочкообразования используют как при холодной, так и при горячей деформации образцы с торцевыми проточками и выточками, заполняемыми смазкой. Кольцевые канавки способствуют удержанию смазки, а буртики расточек играют роль запорных устройств, препятствующих выдавливанию смазки. Смазка, находясь под высоким давлением при осадке, воздействует на буртики и создает дополнительные радиальные напряжения. Разновидности профилировки торцевых поверхностей образцов показаны на рис. 5 [14]. В работе [11] отмечается, что удельное давление при осадке с выточками до смятия буртиков отличается от  $\sigma_s$  не более чем на 3 % на образцах, осажённых до  $\varepsilon = 0,8 \dots 1,0$ .

Глубина канавок и расточек (высота буртиков) подбирается в зависимости от изучаемых материалов, условий проведения испытаний и вида применяемых смазок и колеблется в диапазоне 0,1...0,5 мм. Слишком мелкие углубления не дают эффекта в устранении бочкообразования, а высокие буртики порождают столь высокие радиальные напряжения, что образец приобретает вогнутую боковую поверхность. В обоих случаях нарушается условие одноосной деформации, и результаты получаются завышенными. При испытаниях в холодном состоянии в качестве смазок используют консистентные смазки, металлические мыла, синтетические жирные кислоты; при температурах около 400<sup>0</sup>С применяются дисульфид молибдена и тефлон; при температуре от 400 до 700<sup>0</sup>С – фосфатные смазки, графит или фосфатное стекло, при температуре выше 700<sup>0</sup>С – стекла различного химического состава [12].

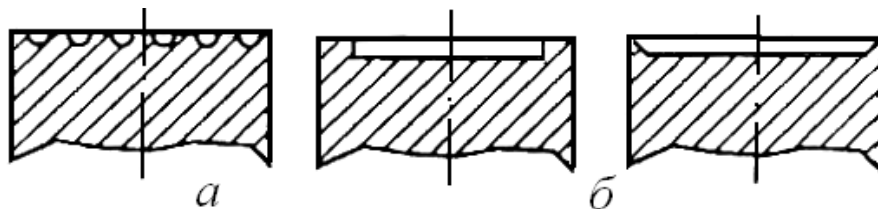


Рис. 5. Форма канавок (а) и буртиков (б) на торце цилиндрических образцов для испытаний на сжатие

По мнению авторов [20], между буртиками и осадочными плитами при осадке образцов с торцевыми выточками возникает трение металла по металлу. Влияние этого трения на результат определения силы осадки остается значимым, поэтому трение в месте соприкосно-

вения плит с антифрикционным слоем (смазкой) предлагается учитывать с помощью выражения  $\sigma_s = pK$ ,

$$\text{где } K = 1 - \frac{2}{3h_0r_0^2} \left\{ \nu(r_0 - \delta)^3 + \mu \left[ r_0^3 - (r_0 - \delta)^3 \right] \right\};$$

$\nu$  и  $\mu$  – коэффициенты трения соответственно по антифрикционной прокладке и по металлу;

$r_0$  – исходный радиус сечения образца;

$h_0$  – исходная высота образца;

$\delta$  – ширина буртика расточки.

Предполагается, что трение металла по металлу в зоне буртика оказывает влияние на процесс лишь в начальный момент деформирования, а далее остается лишь трение по антифрикционной смазке вплоть до полного смятия буртиков; авторы [20] предлагают заменить в приведенной формуле  $\mu$  на  $\nu$  и использовать ее в значительно упрощенном виде:

$$\sigma_s = p \left( 1 - \frac{2r_0}{3h_0} \nu \right).$$

Пригодность метода осадки образцов с торцевыми канавками и выточками неоднократно проверялась экспериментально: визуальной оценкой степени бочкообразования, измерением твердости внутри образца и на его поверхности, измерением коэрцитивной силы образцов, вырезанных из центральной и периферийной частей, макроанализом [11]. Бочкообразование и неоднородность деформации отсутствуют при степени деформации до 0,6...0,7.

В работе [20] даны рекомендации по рациональному выбору размеров образцов с торцевыми выточками:  $h_0 = 2r_0$ ;  $\delta = 0,03r_0$ ; глубина проточки (высота буртиков)  $h = \delta$ . В качестве смазки при проведении холодных испытаний рекомендуется стеарин, который наносится в жидком состоянии и выравнивается по высоте буртиков.

Когда в результате применения известных методов снижения трения на торцевых поверхностях не удастся все же устранить бочкообразования, сопротивление деформации определяют по одной из известных формул [10, 14]:

$$\sigma_s = \frac{p}{1 + \frac{1}{3} \mu \frac{d}{h}}, \text{ формула С.И. Губкина и Е. Зибеля;}$$

$$\sigma_s = \frac{P}{0,315\mu \frac{d}{h} + \sqrt{1 + \left(0,315\mu \frac{d}{h}\right)^2}}, \text{ формула А.Ф. Головина};$$

$$\sigma_s = \frac{P}{F_0 e^{\varepsilon} \left(1 + 0,17 \frac{d_0}{h_0} e^{1,5\varepsilon}\right)}, \text{ формула Е.П. Унксова};$$

$$\sigma_s = \frac{P}{F_{\max} \left(1 - \frac{r_{\max}}{4\rho} + \frac{\mu}{3} \cdot \frac{d-h}{h}\right)}, \text{ формула К. Рейшетера},$$

где  $\rho = \frac{h}{8(r_{\max} - r)}$  – радиус кривизны образующей боковой поверхности образца при текущей высоте  $h$  и радиусе максимального поперечного сечения (площадью  $F_{\max}$ )  $r_{\max}$ ;

$r$  – радиус контактной поверхности,  $r = d/2$ ;

$\mu$  – коэффициент трения;

$P$  – среднее контактное давление при текущем значении силы осадки  $P$ .

Первые три формулы рекомендуется [10] использовать для сравнительно небольших деформаций  $\varepsilon = \ln(h_0/h) = 0,6 \dots 0,8$ . При больших обжатиях и  $h/d < 1$ , когда наблюдается значительное искажение формы боковой поверхности осаживаемого образца, используют формулу К. Рейшетера. К сожалению, все приведенные формулы получены в предположении, что коэффициент трения  $\mu$  остается постоянным в течение всего процесса деформации, что не соответствует действительности. Можно проводить испытания на осадку в горячем состоянии вообще без смазок, т.е. заведомо создавая зону прилипания на контакте с инструментом. Контактная поверхность диаметром  $d$  растет в процессе осадки за счет перехода металла с боковой поверхности на контактную. Сопротивление деформации при таком испытании оценивают величиной

$$\sigma_s = \frac{P}{1 + \frac{d}{6h}} \quad (\text{формула Н. Липимана}),$$

в которой считают  $\mu = 0,5$ , или  $\sigma_s = \frac{P}{F_0 e^{\varepsilon} \left( 1 + 0,17 \frac{d_0}{h_0} e^{1,5\varepsilon} \right)}$

(формула Е.П. Унксова).

### 3.3. Методы испытаний на кручение

При испытании на кручение по ГОСТ 3565-80 фиксируются и определяются следующие геометрические и физические величины:

- модуль упругости  $G$  при сдвиге кручением как отношение касательного напряжения к относительному сдвигу в области упругой деформации, не входящей за предел пропорциональности;
- относительный сдвиг при кручении  $\gamma$  как отношение длины дуги поворота одного поперечного сечения образца (точки 1, 1', 3, 3' на рис. 6) относительно окружности другого его поперечного сечения (точки 2, 2', 4, 4') к расстоянию между сечениями  $d_x$ ; сдвиг подразделяют на упругий, исчезающий после снятия нагрузки, и остаточный (упруго-пластический), остающийся после снятия нагрузки;
- предел пропорциональности при кручении  $\tau_{\text{пл}}$  – касательное напряжение, вычисленное условно по формулам для упругого кручения, при котором отклонение от линейной зависимости между напряжениями и деформациями на поверхности круглого в сечении образца достигает такой величины, при которой тангенс угла наклона касательной в точке кривой деформации и осью нагружения, превышает первоначальное значение на 50 %;

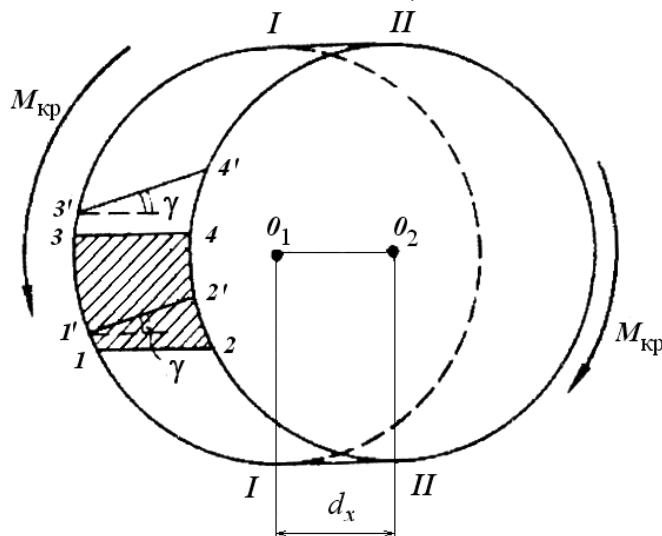


Рис. 6. Схема сдвига при кручении

- предел упругости  $\tau_{yn}$  – касательное напряжение, вычисленное по формулам для упругого кручения, при котором образец получает остаточный сдвиг, соответствующий обусловленному допуску: 0,0045; 0,0075; 0,015 %;
- предел текучести при кручении (условный)  $\tau_{0,3}$  – касательное напряжение, вычисленное условно по формулам для упругого кручения, при котором образец получает сдвиг, равный 0,3%;
- истинный предел прочности при кручении  $\tau_k$  – наибольшее касательное напряжение, вычисленное по наибольшему скручивающему моменту, предшествовавшему разрушению образца, с учетом пластической деформации;
- условный предел прочности при кручении  $\tau_{пч}$  – наибольшее касательное напряжение, вычисленное по формуле для упругого кручения и отвечающее наибольшему скручивающему моменту, предшествовавшему разрушению.

В соответствии со стандартом на кручение испытываются образцы круглого поперечного сечения диаметром 10 мм и с расчетной длиной 100 или 50 мм с концевыми частями, соответствующими конфигурации захватов стандартных испытательных машин. При проведении испытаний на определение сопротивления деформации на специализированных крутильных установках и крутильных пластометрах форма и размеры образцов могут быть самыми разнообразными. В случае использования стандартных образцов обеспечивают на их рабочих поверхностях чистоту Ra 1,25 мкм (при  $\sigma_b \leq 1570$  МПа) или Ra 0,32 мкм (при  $\sigma_b > 1570$  МПа).

Традиционное конструктивное исполнение машин для испытаний на кручение показано на рис. 7. Машины могут иметь вертикальное и горизонтальное исполнение (положение оси образца).

Схема проведения крутильных испытаний изображена на рис.8 [2].

Регистрирующее устройство во время испытания записывает диаграмму кручения в координатах момент кручения – угол поворота ( $M-\varphi$ ), типовой вид которой показан на рис. 9 [2].

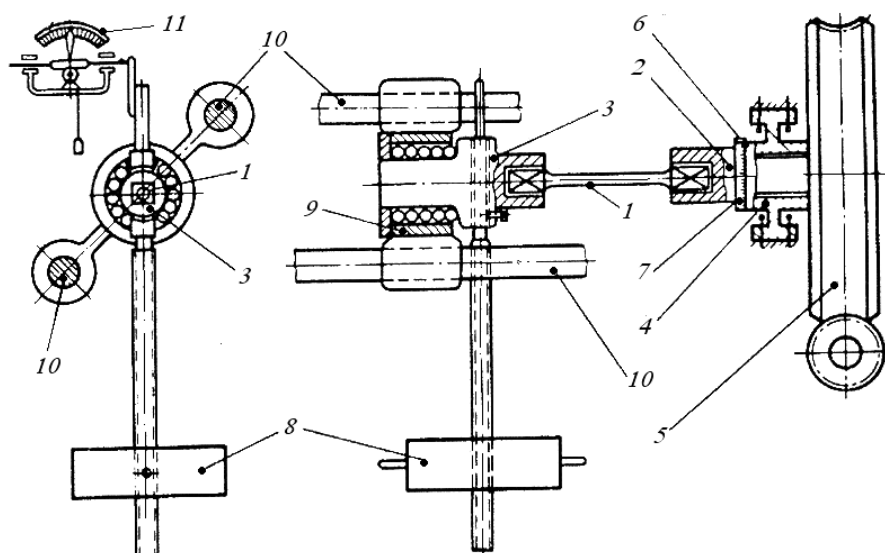


Рис. 7. Машина для испытания на кручение [2]: 1 – образец; 2,3 – зажимы; 4 – подшипник; 5 – червячное колесо; 6 – указатель; 7 – шкала; 8 – маятник; 9 – шарикоподшипник; 10 – направляющие; 11 – силоизмеритель

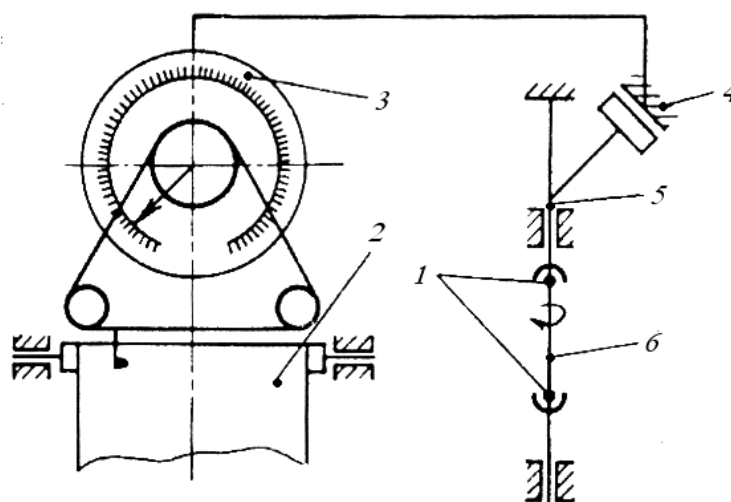


Рис. 8. Схема испытания на кручение (машина 2014МК-50): 1 – захваты; 2 – регистрирующее устройство; 3 – индукционный датчик; 4 – торсионметр; 5 – упругий элемент; 6 – испытуемый образец

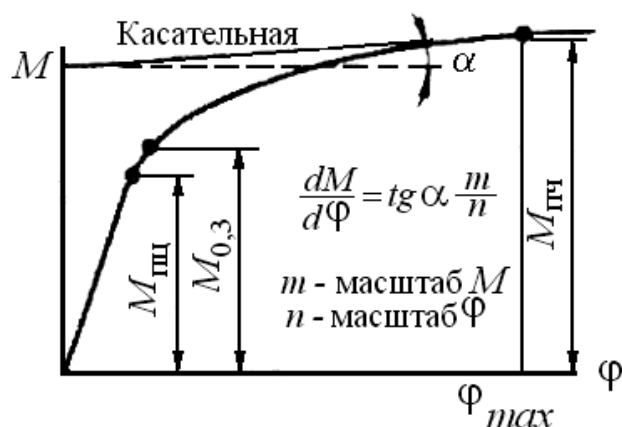


Рис. 9. Диаграмма кручения

Для определения малых углов закручивания (при определении модуля упругости второго рода, пределов пропорциональности, упругости и текучести) используется зеркальный прибор Мартенса или другие чувствительные тензометры. В этом случае угол закручивания определяется как разность углов  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  поворота сечений  $f_1$  и  $f_2$  по концам расчетной длины образца (рис. 10) [2].

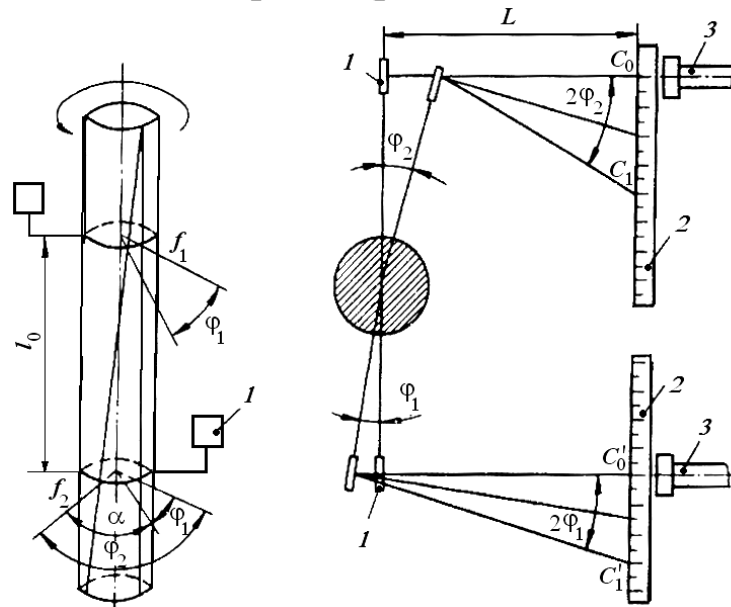


Рис. 10. Схема зеркального прибора Мартенса, применяемого при испытании на кручение: 1 – зеркала; 2 – шкалы; 3 – осветители;  $L$  – расстояние от зеркала до шкалы;  $l_0$  – расстояние между захватами;  $C_0$  и  $C'_0$  – нулевые значения по шкале;  $C_1$  и  $C'_1$  – перемещения по шкале

Если образец при кручении находится в упругой области, то модуль упругости

$$G = \frac{M l_0}{(\varphi_1 - \varphi_2) I_p},$$

где  $I_p$  – полярный момент инерции сечения образца (для круглого сечения  $I_p = \frac{\pi d_0^4}{32}$ ).

Определяя предел текучести при кручении, деформацию до предела пропорциональности считают упругой, а за пределом пропорциональности – упруго-пластической.

По полученным значениям моментов  $M$  и по угловым показателям  $\varphi_1 - \varphi_2$ , соответствующим пределу пропорциональности, вычисляют значения наибольшего касательного напряжения  $\tau = \frac{M}{W_p}$ ,



где  $W_p$  – полярный момент сопротивления (для круглого сечения  $W_p = \frac{\pi d_0^3}{16}$ ), и относительный сдвиг  $\gamma = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2l_0} \cdot 100\%$ .

К вычисленному для предела пропорциональности относительному сдвигу прибавляют 0,3 % и находят  $\tau_{0,3} = M_{0,3}/W_p$ , где  $M_{0,3}$  – момент, соответствующий остаточному сдвигу 0,3%.

Предел текучести может быть найден графически. Для этого по полученным при испытании значениям моментов и углов закручивания вычисляют значения наибольшего касательного напряжения  $\tau$  и относительного сдвига  $\gamma$  и строят диаграмму зависимости  $\tau - \gamma$ . По оси абсцисс откладывают значения установленного для предела текучести относительного сдвига 0,3 % и от этой точки проводят прямую, параллельную начальному прямолинейному участку, до пересечения с кривой диаграммы. Ордината точки пересечения соответствует значению  $\tau_{0,3}$ . Величину  $\tau_{0,3}$  можно определить и по диаграмме (рис. 9), если она построена в большом масштабе.

Стандартное испытание на кручение можно использовать лишь при построении кривых упрочнения металлов, деформируемых в холодном состоянии, поскольку оценка сопротивления сдвиговой деформации величиной  $\tau_{0,3}$  может быть выполнена корректно только в момент перехода от упругого к упруго-пластическому кручению. Поэтому образцы для стандартных крутильных испытаний изготавливаются из предварительно продеформированных в холодном состоянии заготовок с известной степенью деформации. Естественно, итоговая зависимость  $\tau_{0,3}$  от степени деформации определяется теперь не только маркой материала, но и способом предварительного деформирования заготовок, из которых изготавливаются образцы для кручения. В этом случае целесообразно использовать логарифмическую степень деформации  $\varepsilon$ , достигнутую при предварительной холодной пластической обработке, и сопротивление деформации оценивать величиной  $\sigma_s = \sqrt{3}\tau_{0,3}$ . Степенное упрочнение, полученное холодными волочением, прокаткой, экструдированием или каким-либо иным способом ОМД, скорее всего, не соответствует упрочнению, которое достигается при упруго-пластическом кручении.

Важным достоинством испытаний металлов на кручение является возможность достижения больших деформаций, близких к чистому

сдвигу. Если кривая упрочнения построена на основе диаграммы кручения, то она уже не зависит от способа нагартовки заготовок, из которых вытачивают образцы для испытаний на кручение.

Стандартные испытания на кручение вообще не приемлемы для описания зависимости сопротивления деформации от температуры и скорости деформации. Следовательно, кривые упрочнения для больших горячих деформаций нельзя получить стандартными испытаниями на кручение.

В случае упруго-пластического кручения степень деформации оценивается величиной

$$\varepsilon = \operatorname{tg} \frac{\varphi d}{2l_0} / \sqrt{3},$$

где  $\varphi$  – угол взаимного разворота сечений образца, отстоящих друг от друга на расстоянии базовой длины  $l_0$ .

Однако при упруго-пластическом кручении сложной задачей является определение напряжений сдвига, поскольку касательные напряжения в центральной части образца распределены линейно по радиусу сечения и явно нелинейно в периферийной части. Уточнить закон распределения касательных напряжений в пластической области можно, зная зависимость сопротивления от степени деформации. Но испытания и направлены на определение этой зависимости. Поэтому решение задачи расчета  $\tau_s$  при упруго-пластическом кручении всегда связано с привлечением некоторых далеко не всегда правомерных гипотез. Особую сложность представляет изучение упруго-пластического кручения при горячей деформации, где зафиксировать температуру и скорость деформации практически невозможно, поскольку они распределяются неравномерно по сечению. Эта неравномерность тем больше, чем больше угол закручивания и, следовательно, больше объем металла, находящегося в пластическом состоянии.

Кроме того, при скручивании образцов в них появляются продольные напряжения, которые в зависимости от материала, температуры испытания и степени деформации могут быть растягивающими или сжимающими [10]. Недостатком метода испытания на кручение является также влияние способа крепления образца на результаты определения сопротивления деформации. На результаты испытаний влияют точность размеров и чистота обработки поверхности образцов.

Чаще всего при испытаниях на кручение реализуются сравнительно невысокие скорости деформации, что связано с конструкциями муфт торсионных пластометров, передающих крутящий момент от привода на активный захват, удерживающий образец. Однако с уменьшением базовой длины образцов и применением сервогидравлических приводов удастся поднять скорость деформации до  $100...300 \text{ с}^{-1}$ . При испытаниях на кручение кольцевых образцов достигались скорости деформации до  $1000 \text{ с}^{-1}$  [10].

Достоинством метода упруго-пластического кручения при определении сопротивления деформации являются [12]:

- отсутствие смещения металла относительно инструмента и, следовательно, отсутствие влияния контактного трения на результаты замера крутящего момента;
- возможность варьировать в широких пределах степень деформации и скорость;
- возможность воспроизводить условие непрерывной и ступенчатой деформации с различными степенями и скоростями деформации и временем пауз;
- возможность моделирования термомеханической обработки.

Для определения истинных значений напряжения текучести используется формула Людвики [10, 11]:

$$\tau_s = \frac{3M}{2\pi R^3} \left( 1 + \frac{\gamma}{3M} \cdot \frac{dM}{d\gamma} \right).$$

Однако эта формула неудобна для практического использования из-за необходимости графического дифференцирования при определении производной  $dM/d\gamma$ . В связи с этим Надаи была предложена для упрощенного расчета формула

$$\tau_s = \frac{1,6M}{\pi R^3},$$

где  $R$  – радиус сечения образца.

Чаще всего эту формулу употребляют в виде  $\tau_s = \frac{3}{2} \frac{M}{\pi r^3}$ .

При учете возникающего при испытании на кручение осевого напряжения используется формула [14]:

$$\sigma_s = \sqrt{\sigma_{\text{ос}}^2 + 3\tau_{\text{max}}^2},$$

где  $\sigma_{oc} = \frac{P_{oc}}{\pi R^2}$  – осевое напряжение;  $\tau_{max} = \frac{3M}{2\pi r^3}$  – касательное напряжение на поверхности скручиваемого образца.

Испытание на кручение проводят на цилиндрических образцах как сплошного сечения, так и полых. Кручение трубчатых образцов с достаточно тонкой стенкой дает хорошие результаты при определении  $\tau_s$  при сравнительно малых степенях деформации. При больших углах скручивания тонкие стенки образца теряют устойчивость. Известные методы повышения устойчивости процесса при испытании полых цилиндрических образцов, а именно внутреннее давление, использование сердечников и т.п. не нашли практического применения при горячих испытаниях на кручение. Поэтому более широко используются при получении кривых упрочнения образцы сложного круглого сечения. Трубчатые образцы хорошо применять для построения кривых деформационного упрочнения. Для образцов с тонкой стенкой степень и скорость деформации по толщине стенки могут считаться постоянными. По уравнению Филдса и Бекофена [12]

$$\tau_s = \frac{3M}{2\pi(R^3 - r^3)},$$

где  $R$  и  $r$  – соответственно наружный и внутренний радиусы трубчатого образца.

При кручении круглых сплошных образцов чаще всего пользуются формулой Надаи, несмотря на то, что практически на всем диапазоне степеней деформации она дает завышенные значения. В работе [19] предложено величину сопротивления деформации при упруго-пластическом скручивании сплошных образцов определять по формуле

$$\tau_s = \tau_y + K \ln \frac{\gamma}{\gamma_y},$$

где  $\tau_y$  – предел упругости;  $\gamma_y$  – относительный сдвиг, соответствующий физическому пределу упругости;  $K$  – логарифмический модуль упрочнения, определяемый выражением

$$K = \tau_p - \tau_y / \ln \frac{\gamma_p}{\gamma_y};$$

$\tau_p$  – касательное напряжение в момент разрушения;

$\gamma_p$  – относительный сдвиг, соответствующий разрушению.

Эта формула удовлетворительно работает при  $\gamma > 0,1$ . Для металлов и сплавов, не имеющих площадки текучести, формула дает хорошее совпадение результатов с результатами, полученными по формуле Людвига. Кроме того, эта формула позволяет учитывать упрочнение при анализе процесса кручения.

Перспективным для широкого практического использования можно считать метод Мура [10, 14], состоящий в испытаниях на кручение в одинаковых температурно-скоростных условиях двух партий образцов с различными диаметрами рабочей части  $d_1$  и  $d_2$ . Касательное напряжение, оценивающее величину сопротивления сдвиговой деформации, определяется выражением

$$\tau_s = \frac{12(M_1 - M_2)}{\pi(d_1^3 - d_2^3)},$$

где  $d_1 > d_2$  – диаметры образцов;

$M_1$  и  $M_2$  – крутящие моменты при равных относительных сдвигах.

Этот метод, называемый дифференциальным, может рассматриваться как заменитель метода испытания на кручение тонкостенных труб. Устраняя опасность потери устойчивости, достигают при кручении значительных относительных сдвигов. Особенность метода состоит в том, что разница диаметров образцов не может быть малой, так как в этом случае недостаточная точность измерения крутящих моментов не позволяет достаточно точно определить напряжения сдвига и оценить величину сопротивления деформации. Кроме того, трудно осуществить скручивание двух образцов с разными диаметрами в одинаковых температурно-скоростных условиях. Даже при равенстве исходных температур в процессе кручения проявляется различный тепловой эффект пластической деформации [12]. Формула Мура для расчета величины  $\tau_s$  получена из выражения для разности крутящих моментов

$$M_1 - M_2 = \tau_s \int_0^{2\pi} \int_{d_2/2}^{d_1/2} r^2 dr d\varphi.$$

При этом допускается, что при малой разности  $d_1 - d_2$  и, следовательно, малой толщине поверхностного слоя сдвиговое напряжение, принимаемое за сопротивление металла сдвиговой деформации, не зависит от радиальной координаты.

По мнению автора [11], несмотря на недостатки метода построения кривых текучести по результатам испытаний на кручение, сводящиеся к неравномерности напряженного состояния по сечению образца (максимальная деформация на периферии и близкая к нулю в осевой зоне), истинное напряжение текучести может быть определено по приведенным формулам. Поэтому можно считать, что метод пригоден для построения кривых упрочнения как в холодном, так и в горячем состоянии в достаточно широком диапазоне определяющих факторов.

### 3.4. Другие методы испытания при определении сопротивления деформации металлов и сплавов

Для того, чтобы определить сопротивление деформации из результатов испытаний на изгиб, необходимо соблюдение следующих условий: на призматические образцы действует нагрузка перпендикулярно продольной оси; размеры поперечного сечения образцов малы по сравнению с длиной, чтобы снизить влияние тангенциальных напряжений сдвига; поперечное сечение при изгибе должно оставаться плоским; поперечная деформация мала и не учитывается, т.е. толщина образца считается постоянной.

Испытание на изгиб в соответствии с ГОСТ 14019-80 проводят по двум схемам (рис. 11): сосредоточенной нагрузкой, приложенной в середине пролета (рис. 11, а); двумя равными симметрично приложенными нагрузками, создающими на определенном участке чистый изгиб (рис. 11, б).

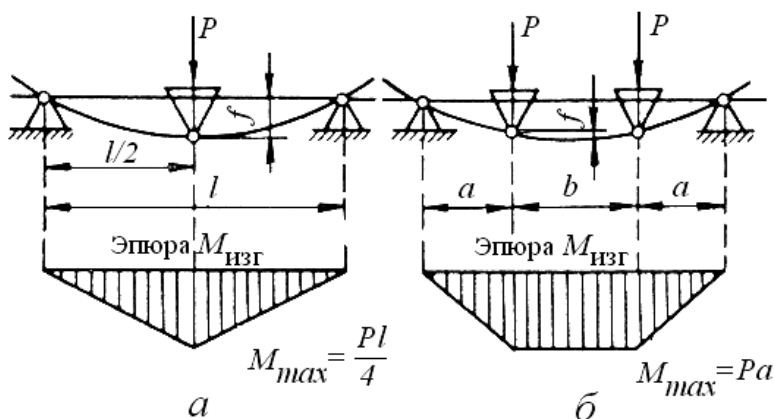


Рис. 11. Схема испытаний на изгиб: а – сосредоточенный; б – чистый

В первом случае наибольший изгибающий момент  $M_{\text{изг}} = Pl/4$ ; при чистом изгибе –  $M_{\text{изг}} = Pa/2$ . Результаты испытаний по второй схеме

более точны, поскольку максимальный изгибающий момент возникает на протяженном участке чистого изгиба, а не в одном среднем сечении. При изгибе можно определить пределы пропорциональности, упругости и текучести при точном замере деформации. При изгибе устраняется существенный недостаток испытаний на растяжение и сжатие – влияние перекосов и внецентренности при установке образцов [11].

Сложность определения  $\sigma_s$  по результатам испытаний на изгиб состоит в неопределенности взаимосвязи между главными нормальными напряжениями, а также между главными нормальными напряжениями и деформациями [12]. Чаще всего кривые текучести, полученные при испытаниях на изгиб, располагаются ниже кривых, полученных при других рассмотренных видах испытаний.

При определении сопротивления сдвиговой деформации  $\tau_s$  могут использоваться испытания на чистый сдвиг, осуществляемые в специальных приспособлениях на образцах двух типов – круглой и прямоугольной формы, показанных на рис. 12 [13]. Круглый образец в верхней части имеет отверстие, близкое по диаметру хвостовика. Образец устанавливается в приспособление (рис. 13), в состав которого входят калиброванные пуансон и матрица (основание). Прямоугольный образец (рис. 12, б) имеет соответствующий паз и хвостовик, толщина которого совпадает с шириной паза.

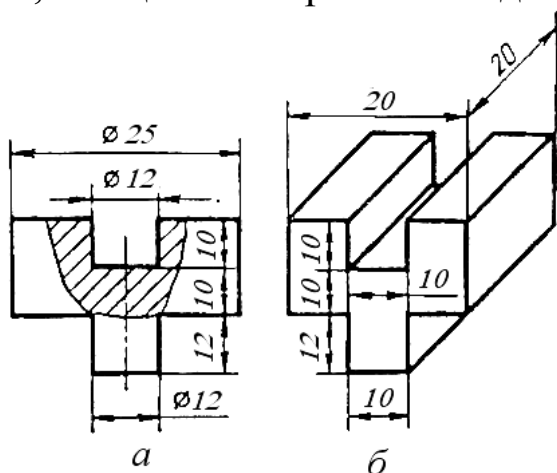


Рис. 12. Форма и размеры образцов для испытания на чистый сдвиг (срез):  
а и б – круглый и прямоугольный образцы соответственно

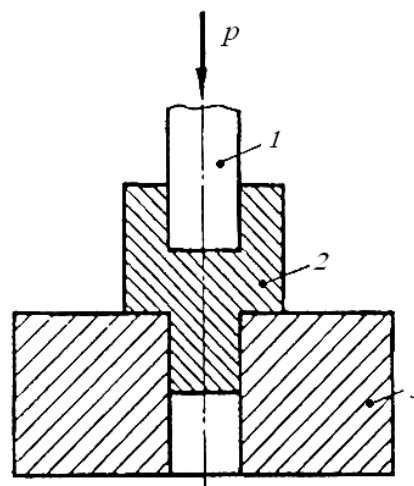


Рис. 13. Схема приспособления для испытания на сдвиг круглых образцов: 1 – пуансон; 2 – образец; 3 – основание

Перед испытанием образец вставляется хвостовиком в отверстие матрицы, после чего в отверстие образца устанавливается пуансон

или нож (для прямоугольных образцов). Высота пуансона или ножа составляет 30...40 мм. Между пуансоном и отверстием матрицы обеспечивается регламентированный зазор, величина которого определяет величину степени сдвиговой деформации  $\gamma = \text{tg}(\Delta h/\delta)$ , где  $\Delta h$  – перемещение пуансона,  $\delta$  – величина зазора. В подобных испытаниях  $\tau_s$  определяют делением силы среза, приложенной к пуансону, на площадь поверхности среза. Однако получать качественную зависимость  $\tau_s$  от  $\gamma$  достаточно сложно из-за больших ошибок в определении  $\gamma$ . Поэтому степень деформации определяется из истории предварительной пластической обработки металла, из которого изготавливаются образцы. Испытание может проводиться и в условиях теплой деформации. С этой целью образец до заданной температуры нагревается вместе с инструментальной оснасткой и все приспособление в сборе переносится на испытательную машину. В изучении влияния на сопротивление сдвиговой деформации температуры и скорости деформации данное испытание считается малоинформативным. Форма и размеры образцов при испытании на чистый сдвиг могут быть произвольными. Однако размеры площади поверхности среза должны выбираться из условия предотвращения явления смятия металла образца под пуансоном или на матрице.

При построении кривых упрочнения листовых материалов, упрочненных при холодной или теплой прокатке при известной степени предварительной деформации, применим метод гидравлической вытяжки [12]. Лист, установленный на вытяжной штамп, выпучивается под действием давления рабочей жидкости. Поскольку давление всегда действует перпендикулярно поверхности листа, нормальное напряжение  $\sigma$  возникает на внутренней поверхности изгиба листа. Снаружи  $\sigma = 0$ , и предполагается, что среднее нормальное напряжение  $\bar{\sigma}$  составляет половину давления жидкости  $p$ . При определении сопротивления деформации  $\sigma_s = \sigma_{11} - \sigma_{33}$  (в рамках гипотезы Сен-Венана –Треска) следует учитывать радиальные и тангенциальные напряжения в области сферической вмятины. Если вмятина осесимметрична, то в ее вершине эти напряжения равны и сопротивление деформации определяют по формуле

$$\sigma_s = \frac{p}{2} \left( \frac{R}{S} + 1 \right),$$

где  $R$  – радиус сферы;  $S$  – толщина испытуемого листа.



Истинная главная деформация в этом случае определяется выражением  $\varepsilon = \ln \frac{\delta_0}{\delta}$ ,  $\delta_0$  – исходная толщина листовой заготовки.

В качестве образца служит листовая заготовка круглой или квадратной формы, зажимаемая при испытании между матрицей и прижимной плитой. Давление на заготовку передается маслом, подаваемым в рабочую полость насосом (при статических испытаниях), либо за счет электроимпульсного разряда в замкнутом объеме рабочей полости (при динамических испытаниях).

Для получения нескольких значений напряжения текучести и соответствующей ему степени деформации осуществляют ступенчатое нагружение, фиксируя на каждой ступени давление и толщину листа на вершине вытянутой сферы.

В практике определения сопротивления деформации листовых материалов методом гидравлической вытяжки широко используются приборы для определения прогиба  $d$  на вершине выдавленной сферы на базе  $2r$ , определяемой положением двух щупов, упирающихся в поверхность листа. За счет такого прибора удастся устранить ошибки в определении напряжений и деформаций, связанные с краевыми эффектами на контуре контакта листа с матрицей. Кроме того, если анизотропные свойства нарушают осевую симметрию выдавливаемой лунки, то появляется возможность хотя бы сравнительной оценки зависимости сопротивления деформации от направления в плоскости листа.

При использовании такого прибора, называемого сферометром Моллера [11], сопротивление деформации оценивается величиной

$$\sigma_s = \frac{p\rho}{2\delta}, \text{ где } \rho = (r^2 + d^2)^{1/2}d - \text{радиус местной кривизны листа.}$$

Достоинством метода гидравлической вытяжки (формовки) можно считать отсутствие трения между испытуемым образцом и инструментом, а недостатком – сложность экспериментов и необходимость в специальном инструментальном оснащении.

Определенную сложность представляют высокоскоростные (динамические) испытания при определении сопротивления деформации. Высокоскоростные механические испытания проводятся на серийных копровых испытательных машинах, на гидродинамических установках и ротационных копрах, а также на несерийных нестандартных установках оригинальных конструкций. Кроме традиционных испытаний на растяжение, сжатие и кручение используются так-

же высокоскоростные испытания на гидродинамическую раздачу колец, достоинством которых является уменьшение влияния упругопластических волн в деформируемом с высокой скоростью материале, а также достаточно высокая однородность деформации по сечению и длине образцов. На рис. 14 показана схема высокоскоростной гидродинамической раздачи тонких колец [10].

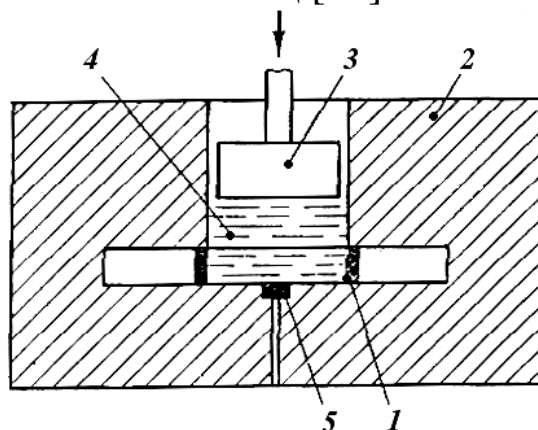


Рис. 14. Схема испытаний по методу динамической раздачи тонких колец:  
1 – образец; 2 – контейнер; 3 – плунжер; 4 – рабочая жидкость;  
5 – мембранный датчик

Сопротивление деформации при таком испытании авторы рекомендуют определять по формуле

$$\sigma = -\rho \frac{(R_0^2 - r_0^2)}{(R - r)} \cdot \frac{l_0}{l} \bar{R},$$

где  $\rho$  – плотность материала образца;

$R_0$  и  $r_0$  – соответственно начальные наружный и внутренний радиусы кольца;

$R$  и  $r$  – текущие наружный и внутренний радиусы;

$\bar{R} = \frac{R + r}{2}$  – средний текущий радиус кольца;

$l_0$  и  $l$  – начальная и текущая высота кольца.

Среднее за процесс плоской прокатки значение сопротивления деформации может быть определено методом измерения среднего контактного давления. Параметр  $l/h_c$ , где  $l$  – длина очага деформации при прокатке ( $l \cong \sqrt{\Delta h R}$ , где  $\Delta h$  – абсолютное обжатие,  $R$  – радиус вала),  $h_c$  – средняя высота полосы в зоне обжатия, оказывает приблизительно одинаковое влияние на величину среднего контактного  $p$  для всех материалов. Правда, в исследованиях установлено

также влияние на  $p$  обжатия и относительной начальной высоты. В общем случае минимум на графике  $p = p(l/h_c)$  регистрируется при  $l/h_c \approx 1,0$ . Этот факт используют, чтобы относительно просто определить среднее значение сопротивления деформации при плоской как холодной, так и горячей прокатке:

$$\bar{\sigma}_s = \frac{p}{\mu_\sigma n_\sigma},$$

где  $p = \frac{P_\Pi}{F_k}$  – среднее контактное давление;

$P_\Pi$  – полное давление металла на валки;

$F_k$  – площадь контактной поверхности ( $F_k = l \cdot b$ , где  $b$  – ширина полосы);

$\mu_\sigma$  – коэффициент напряженного состояния Лоде;

$n_\sigma = \frac{e^m - 1}{m}$  – коэффициент, учитывающий влияние внешнего трения и сдвиговых деформаций;

$m = \mu \frac{l}{h_c}$ ;  $\mu$  – коэффициент трения.

Степень деформации при прокатке оценивается величинами  $\varepsilon = \Delta h/h_0$  либо  $\varepsilon = \ln h_0/h$ , а средняя скорость деформации  $\dot{\varepsilon}_c = V_1 \varepsilon/l$ , где  $V_1$  – скорость полосы на выходе из валков при плоской прокатке.

Результаты проведенных исследований показали пригодность этого метода для исследования сопротивления деформации металлов и сплавов, если прокатный стан оснащен аппаратурой для надежного измерения полного давления металла на валки.

При экспресс-оценке величины сопротивления деформации металлов и сплавов иногда пользуются методом измерения твердости, который основан на корреляционной связи между напряжением внедрения индентора в упруго-пластическое полупространство деформируемого материала и величиной сопротивления деформации, которое в данном случае оценивается величиной условного предела текучести  $\sigma_{0,2}$ .

В данной методике [18] не делают различия между  $\sigma_T$  и  $\sigma_{0,2}$ , поскольку экспериментально установлено, что для материалов, имеющих площадку текучести, значения  $\sigma_T$  не зависят от того, как

они определяются – по площадке текучести или остаточной деформации 0,2 %.

Способ определения предела текучести методом вдавливания шарика основан на нахождении твердости по Бринеллю на пределе текучести  $HB_{0,2}$  по диаметру отпечатка  $d_{0,2}$ . Относительный диаметр остаточного отпечатка на пределе текучести  $(d/D)_{0,2}$ , при котором остаточная деформация достигает 0,2 %, рассчитывается по известным формулам внедрения инденторов, например по формуле М.П.Марковца  $d_{0,2}/D = 0,09$ , где  $D$  – диаметр шара.

Твердость на пределе текучести определяется по формуле  $HB_{0,2} = P_{0,2}/M_{0,2}$ , где  $P_{0,2}$  – нагрузка вдавливания, соответствующая диаметру отпечатка  $d_{0,2}$ ;  $M_{0,2}$  – площадь поверхности этого отпечатка.

Установлено [18], что между  $\sigma_{0,2}$  и  $HB_{0,2}$  существует устойчивая корреляционная связь, которая может быть представлена степенным уравнением  $\sigma_{0,2} = b(HB_{0,2})^c$ , где  $b$  и  $c$  – постоянные коэффициенты для отдельных групп металлов. Эта методика определения предела текучести регламентирована в настоящее время ГОСТ 22762-77.

Для многих сталей, а также для большинства алюминиевых сплавов эта зависимость близка к линейной и записывается в виде  $\sigma_{0,2} = b(HB_{0,2})$ . Основной недостаток этой методики определения условного предела текучести заключается в том, что она содержит определенные допущения и эмпирические зависимости, устанавливаемые для отдельных групп материалов. В этом отношении более перспективен способ определения твердости на пределе текучести непосредственно по диаграмме вдавливания в зоне перехода упругой деформации в упруго-пластическую.

В соответствии с экспериментальными данными, приведенными в книге [25], коэффициент  $b$  в последней формуле имеет следующие значения для сплавов алюминия и магния:

Сплав	$b$	Сплав	$b$
АМц	0,166	АК4-1	0,233
АМг1	0,204	ВД17	0,233
АМцМ	0,167	МА1	0,312
АМг2М	0,178	МА3	0,367
Д1	0,244		

Следует признать, что данных по корреляционной связи между сопротивлением деформации и твердостью для алюминиевых и магниевых сплавов чрезвычайно мало, и их трудно рекомендовать к широкому технологическому применению.

Изобилие методов определения сопротивления деформации, нашедших практическое применение, затрудняет выбор конкретного метода, который бы позволял описывать изменение  $\sigma_s$  в конкретных процессах обработки металлов давлением. Авторы [12] считают, что результаты испытаний на растяжение, осадку, кручение и прокатку для одинаковых условий деформации совпадают. В то же время результаты испытаний на кручение сплошных образцов зачастую занижены (до 20 %) по отношению к результатам, полученным при испытании на осадку цилиндрических образцов. Данные испытаний на кручение полых образцов при большой степени деформации соответствуют данным испытаний на осадку.

В книге [11] определены главные критерии целесообразного выбора методов испытаний при построении кривых упрочнения:

- достаточная точность определения  $\sigma_s$  и  $\varepsilon$  или  $\tau_s$  и  $\gamma$ ;
- малые систематические ошибки и возможность статистического анализа случайных ошибок замера определяющих параметров;
- недопустимость при построении кривых упрочнения экстраполяции;
- осуществление деформации непрерывно до конечной степени при технически достижимой стабилизации остальных определяющих факторов;
- минимальное количество измеряемых параметров;
- достижение результатов на сравнительно малом количестве образцов, имеющих к тому же простую конфигурацию и характеризующихся технологичностью изготовления.

Несмотря на установленное в теории пластичности положение о независимости сопротивления деформации от схемы напряженного состояния, в реальных испытаниях истинные напряжения текучести, полученные по различным методикам, не совпадают, причем различие превышает погрешности измерений и расчетов. Можно предположить, что это несовпадение при испытании реальных металлов и сплавов связано с неучетом анизотропии, нарушениями сплошности, структурной и химической неоднородностью заготовок и полуфабрикатов, из которых изготавливаются образцы.

«Теоретические положения о равнозначности величин напряжения текучести при различных схемах деформации базируются именно на предположениях об изотропности и неразрывности тел, что не характерно для промышленных металлов и сплавов. В связи с этим даже с теоретической точки зрения напряжения текучести, возникающие в реальных сплавах и металлах при разных напряженных состояниях, по-видимому, по своей величине не могут быть равнозначными» [11].

В связи со сказанным можно сделать вывод о том, что схема деформации при проведении испытаний должна быть подобна схеме деформированного состояния анализируемого процесса пластического формоизменения. Таким образом, при выборе вида испытаний трудно отдать предпочтение какому-либо одному методу, поскольку все известные методы имеют достоинства и недостатки. Поэтому рациональным следует считать выбор, соответствующий целям исследования. Например [14], если ставится задача моделирования процесса ОМД с дробным нагружением при больших суммарных степенях деформации (прокатка, свободная ковка и т.п.), предпочтение лучше отдать методу испытаний на кручение или плоское сжатие. Эти методы лучше использовать при моделировании процессов прессования, характеризующихся значительными деформациями.

При использовании любого из описанных методов испытания получаемые зависимости сопротивления деформации от основных факторов будут тем надежнее и тем эффективнее в практическом использовании при анализе процессов ОМД, чем в большей степени будут учтены следующие факторы [14]:

- тип кристаллической решетки материала, структурное состояние и степень анизотропии свойств;
- эффект динамики нагружения и влияние жесткости системы машина-образец;
- роль гидростатического напряжения и масштабного фактора при различных видах испытаний;
- степень локализации деформации и распределение скоростей деформации по длине и сечению образца;
- влияние теплового эффекта пластической деформации и температурный градиент по объему образца;
- способы установки и крепления образцов и определение базовой зоны образца при конкретных испытаниях.

Упомянутое влияние масштабного фактора легко наблюдать даже при испытаниях на растяжение, где от выбранной длины образца на статистическом уровне существенно зависят величины как предела текучести  $\sigma_T$ , так и предела прочности  $\sigma_B$ . Не случайно ГОСТ 1497-73 регламентирует длину образцов. Даже применение пяти и десятикратных образцов, разрешенных стандартом, разделяет производителей и потребителей металлопродукции по предпочтениям в выборе типа образцов. Производителям выгоднее применение коротких образцов, потребителям – длинных.

При проведении высокотемпературных испытаний любого вида не следует забывать о тепловом эффекте пластической деформации, который тем выше, чем больше степень деформации, реализуемая в испытании. Даже при испытаниях при комнатной температуре возможно искажение результатов определения сопротивления деформации вследствие деформационного разогрева.

Например, при равномерной осадке без трения цилиндрического образца высотой  $h_0$  до конечной высоты  $h_K$ , изготовленного из материала, моделирующего жесткопластическую среду ( $\sigma_s = \text{const}$ ), работа деформации

$$A = \int_{h_K}^{h_0} \sigma_s F_0 \frac{h_0}{h} dh = \sigma_s V_0 \ln \frac{h_0}{h_K},$$

где  $V_0$  – объем образца.

В этом случае без учета потерь тепла увеличение температуры образца за счет деформационного разогрева составит  $\Delta t = \frac{\sigma_s \varepsilon_K}{\rho C}$ ,

где  $\rho$  – плотность материала;  $C$  – удельная теплоемкость;  $\varepsilon_K = \ln \frac{h_0}{h_K}$  – конечная логарифмическая степень деформации.

Если металл характеризуется степенным упрочнением и  $\sigma_s = \sigma_{s0} + a \left( 1 - \frac{h}{h_0} \right)$ , где  $a$  – модуль линейного упрочнения;  $h$  – текущая высота образца, то при осадке в описанных условиях работа деформации равна

$$A = \int_{h_K}^{h_0} \left[ \sigma_{s0} + a \left( 1 - \frac{h}{h_0} \right) \right] F_0 \frac{h}{h_0} dh = (\sigma_{s0} + a) F_0 h_0 \ln \frac{h_0}{h_K} - a F_0 (h_0 - h_K),$$

а изменение температуры, также без учета тепловых потерь,

$$\Delta t = \frac{(\sigma_{s0} + a)\varepsilon_k - a(1 - e^{-\varepsilon_k})}{C\rho}.$$

Кроме деформационного разогрева при осадке в изотермических условиях (бойки нагреваются вместе с образцом) происходит дополнительное тепловыделение от работы сил трения на двух контактных поверхностях. При одноосной деформации скорость контактного радиального скольжения металла равна  $V_r = \frac{1}{2} \frac{V}{h} r$ , где  $V = \text{const}$  –

скорость сближения бойков при осадке;  $r$  – текущий радиус.

Если трение определено законом Зибеля, т.е.  $\tau = \psi \tau_s$ , где  $\psi$  – коэффициент трения ( $0 \leq \psi \leq 1$ ),  $\tau_s$  – сопротивление сдвиговой деформации ( $\tau_s = \sigma_s / \sqrt{3}$ ), то работа трения при осадке составит

$$A_T = \frac{\pi}{12} \psi \tau_s d_k^3 \frac{\varepsilon_k}{1 - \varepsilon_k},$$

где  $d_k = d_0 \sqrt{\frac{h_0}{h_k}}$  – диаметр образца после осадки до высоты  $h_k$ .

Следовательно, дополнительный разогрев образца из-за работы трения составит  $\Delta t_T = \frac{A_T}{mC}$ , где  $m$  – масса образца.

Если при испытаниях реализуется адиабатический процесс деформации, то необходимо вводить корректировку по разогреву металла. Известна методика [12] построения так называемых изотермических кривых текучести, согласно которой испытания на осадку проводят со ступенчатым приращением деформации. При этом образец осаживается дискретно до заданных степеней деформации. После каждой ступени осадки образец дополнительно разогревается и его охлаждают в паузах до исходной температуры. Однако эта методика часто провоцирует серьёзные ошибки в определении сопротивления деформации, так как в паузах кроме охлаждения возможен возврат и даже рекристаллизация, сопровождающаяся значительным снижением  $\sigma_s$ . Это особенно проявляется при испытаниях с высокими скоростями деформации.

В теории температурное поле образца при осадке без учета конвективного переноса тепла описывается уравнением теплопроводности [17]:



$$\frac{\partial T}{\partial t} = \chi \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \nu \sigma \dot{\epsilon} \text{ (одномерная задача),}$$

где  $T$  – температура;  
 $t$  – время;

$\chi = \frac{K}{\rho C}$  – коэффициент температуропроводности;

$K$  – коэффициент теплопроводности;

$\nu = \frac{1}{C\rho}$ ;  $\rho$  – плотность материала;  $C$  – удельная теплоемкость.

При решении этого уравнения и при испытаниях на осадку алюминиевых образцов установлено, что тепловой эффект при адиабатическом процессе деформации может составлять при  $\epsilon = 0,1 \dots 0,5$  до  $50 \dots 80^\circ\text{C}$ . Естественно, такой разогрев алюминиевых образцов необходимо учитывать при построении кривых упрочнения. Чаще же результаты испытаний при высоких температурах представляют в функции температур исходного нагрева образцов перед испытанием.

#### 4. Оборудование для пластометрических испытаний

Процедура определения сопротивления деформации, т.е. напряжения, при котором металл переходит из упругого состояния в пластическое при линейной схеме напряженного состояния, в общем случае называется пластометрическим испытанием, а машины и устройства для этих испытаний – пластометрами. Даже универсальные испытательные машины, занятые при изучении сопротивления деформации, вправе называться пластометрами.

Пластометрические испытания относятся к классу кратковременных в отличие от испытаний на ползучесть, на усталость, на длительную прочность. Классификационными признаками пластометрических установок могут являться: назначение, область применения, тип привода и конструктивные особенности устройства, тип устройства для измерения и регистрации параметров деформации [26].

Кратковременные испытания проводятся с заданной скоростью нагружения или с заданной скоростью деформации. Если в области упругих деформаций скорость нагружения до определенных пределов мало сказывается на характере получаемых механических характеристик, то в области пластических деформаций её следует учитывать и,

более того, рассматривать как один из наиболее значимых параметров. Машины для кратковременных и, в частности, пластометрических испытаний в зависимости от диапазона реализуемых скоростей деформации подразделяют на три группы [14]:

- для статических и квазистатических испытаний, обеспечивающих скорость деформации  $d\varepsilon/d\tau = 10^{-6} \dots 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ ;
- для динамических испытаний,  $\dot{\varepsilon} = 0,01 \dots 100 \text{ с}^{-1}$ ;
- для испытаний при сверхвысоких скоростях,  $\dot{\varepsilon} > 100 \text{ с}^{-1}$ .

Существует большое количество классификаций испытательных машин, пригодных для пластометрических исследований. Приведем в качестве примера одну из них, принятую авторами [14]. «По характеру нагружения испытательные машины могут быть со ступенчатым или плавным регулированием скорости деформирования, с нагружением при условии постоянной скорости деформирования или деформации, со сложными законами нагружения по различным задаваемым программам. По характеру привода испытательные машины могут быть механические, гидравлические, пневматические, на энергии пружин, маховика, бойка, а также электроимпульсные и на энергии взрывчатых веществ. Силоизмерительные устройства испытательных машин могут быть рычажно-маятниковыми, пружинными, манометрическими, тензометрическими и электронными».

Современные испытательные машины, пригодные для пластометрических исследований имеют достаточно широкий диапазон нагрузок, скоростей, программное управление функциями нагружения и деформаций, электронные силоизмерительные устройства, самописцы с большим масштабом записи диаграмм испытания, ЭВМ для обработки и хранения опытных данных. В работе [14] приводится перечень предприятий, производящих машины для механических испытаний (табл. 4).

В плане проведения широких пластометрических исследований на универсальных испытательных машинах представляют интерес машины с сервогидроприводом, обеспечивающим скорость деформирования до 10 м/с и скорость деформации при испытаниях на растяжение и сжатие в диапазоне от 0,001 до 100  $\text{с}^{-1}$ . Автоматическое управление и программное обеспечение гарантируют высокую стабильность в отработке заданных функций нагружения и деформации с автоматическим учетом податливости машины.

Еще задолго до появления автоматизированных универсальных испытательных машин с широким диапазоном измерения параметров

нагрузки и деформации, программным управлением и снабженных управляемыми нагревательными устройствами с целью проведения пластометрических исследований было создано достаточно большое количество специализированных пластометров со встроенными устройствами нагрева, обеспечивающих во время испытания постоянство скорости деформации при растяжении, сжатии, кручении.

Таблица 4

Наиболее известные заводы и фирмы по производству машин  
для механических испытаний

Страна	Название завода, фирмы	Город
СССР и Россия	Завод испытательных машин (ЗИМ)	Армавир
	Завод испытательных приборов (ЗИП)	Иваново
	Опытный завод НИКИМП	Москва
ГДР и Германия	Werkstoffprüfmaschinen VEB	Лейпциг
Франция	Th. ringier Industriewerk VEB	Раунштейн
	Adamel Lhomargy S.A.	Иври-на-Сене
	Richard. Jules S.A.	Аржантей
	Société d' Etudes D' Automatisation de Regulation et Appariels de Mesures	Лион
Англия	Creusot-Loire Instrumentation	Иври
	Instron Ltd	Хай-Уикомб
	Servotest Ltd	Гринфорд
	Avery-Denison Ltd	Лидс
	Dartec Stounbridge	Уэст-Мидл
	Solartrou Electronic Group Ltd	Фарнборо
США	M.T.S. System Corp.	Миннеаполис
	Applied Test System Inc.	Саксонбург
	Chatillon, John and Sons, Inc.	Нью-Гарденс
	Solitest Inc.	Эвансон
	Custom Scientific Instruments Inc.	Уипани
Германия	Schenck Trebel GmbH	Ратингер
	Schenck Karl AG	Дармштадт
	Frank Karl GmbH	Вайнхайм
	Zwick GmbH und Co	Ульм
	Wolpert Otto Werke GmbH	Людвигсхафен
	Vishay Micro-Measurements Messtechnik GmbH	Мюнхен
	Frichsen GmbH und Co KG	Хемер-Зундвиг
	Mohr und Federhaff und Losenhausen Prüf und Mess Systeme GmbH	Муангейм
	Los (Losenhausenwerke)	Дюссельдорф
	Shimadzu Seisakusho Ltd	Токио
Япония	Toyo Seiki Seisaku-sho Ltd	Токио
	Tokyo Koki Seizosho Co Ltd	Токио
	Tokyo testing machine MFG, Co	Токио
	Wolpert Werkstoffprüfmaschinen GmbH (Am-sler)	Токио
Швейцария	Walter und Bal	Шафхаузен
	Donau Electronic AG	Лёнинген
Нидерланды	Weld Equip B.V.	Цюрих
	Compagnia Europea	Хельмонд
	Apparecchi Scientifici	Турин
Италия		Турин

## 4.1. Кулачковые пластометры

Наибольшее распространение получили кулачковые пластометры, на которых деформация осуществляется за счет запасенной маховиком энергии, а постоянство скорости деформации обеспечивается существующей профилировкой кулачка, выступающего за контур обода маховика. Кулачок при повороте взаимодействует с толкателем, передающим усилие на боек или захват. Чаще всего на кулачковых пластометрах проводят пластометрические исследования при условии  $\dot{\varepsilon} = \text{const}$ . В этом случае профиль рабочей поверхности кулачка отвечает логарифмическому закону [10]:

$$\frac{h_0}{h_0 - \Delta h} = \exp\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{V_{\text{окр}}} x\right),$$

где  $h_0$  – начальная высота образца;

$\Delta h$  – абсолютная осевая деформация образца;

$V_{\text{окр}}$  – окружная линейная скорость барабана;

$x$  – переменная длина рабочей части кулачка.

Схематично профиль рабочего кулачка показан на рис. 15 [10].

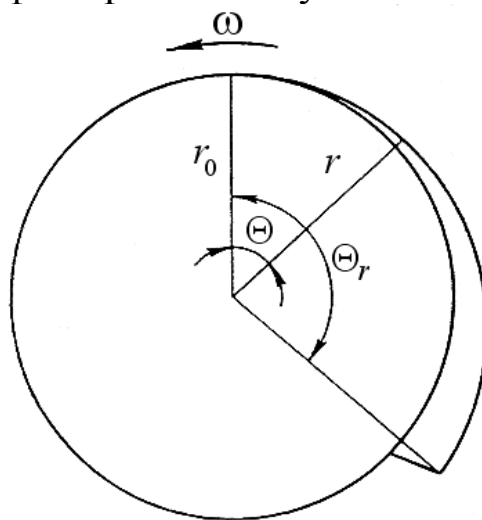


Рис. 15. Профиль рабочего кулачка и барабана для воспроизведения закона  $\dot{\varepsilon}_{\text{сж}} = \text{const}$

При расчете радиуса кривизны кулачка  $r$  (рис. 15) можно пользоваться выражением  $r = h_0(1 - e^{-\theta/\omega}) + r_0$ ,

где  $\theta$  – угловая координата профиля кулачка.

В случае моделирования дробного закона развития деформации на маховик устанавливается несколько профилированных кулачков,

последовательно вводимых в работу через регламентированные паузы.

Первые кулачковые пластометры появились в 50-х годах прошлого столетия в Англии и Польше. Конструкция польского пластометра (разработчики S. Bala и E. Czajka) приведена на рис. 16 [14]. Этот пластометр имеет практически все примененные в дальнейшем при создании аналогичных машин конструктивные элементы. В настоящее время в литературе есть сведения о достаточно большом количестве кулачковых пластометров, созданных по индивидуальным оригинальным проектам. В табл. 5 приведен перечень наиболее известных конструкций пластометров такого типа с указанием авторов, стран и организации, где они установлены и эксплуатируются. В большинстве конструкции пластометров подобны, поэтому покажем конструктивные особенности лишь некоторых из приведенного списка.

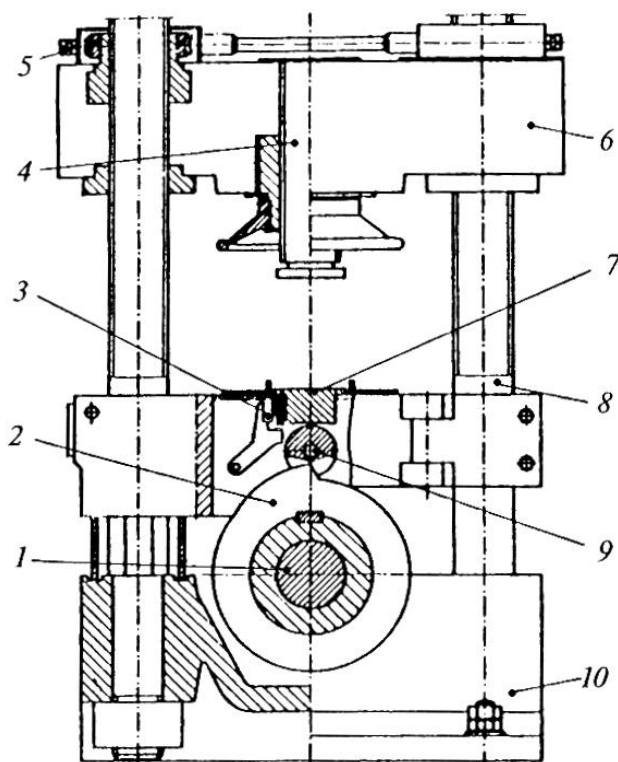


Рис. 16. Схема кулачкового пластометра конструкции Бала –Чайка (Польша):

- 1 – вал пластометра; 2 – диск с рабочим кулачком; 3 – фиксатор бойка;
- 4 – регулируемый винт верхнего бойка; 5 – привод верхней траверсы;
- 6 – верхняя траверса; 7 – активный нижний боек; 8 – колонны;
- 9 – промежуточный вал; 10 – станина

## Данные о кулачковых пластометрах

Авторы	Страна	Институт, завод, город
Ogovan E.	Англия	Шеффилдский университет
Зюзин В. И., Бровман М. Я., Мельников А. Ф.	Россия	Южноуральский машиностроительный завод (г. Орск)
Bailey I. Singer	Англия	Металлургический факультет университета (г. Суонси)
Стукач А. Г., Ляшков В. Б.	Россия	Уральский политехнический институт (г. Екатеринбург)
Kiensle O., Bühler H.	Германия	Высшее техническое училище (г. Ганновер)
Тюленев Г. Г., Андреюк Л. В.	Россия	Научно-исследовательский институт металлов (г. Челябинск)
Быков Л. А., Третьяков А. В.	Россия	Московский институт стали и сплавов (г. Москва), НИИтяжмаш (г. Екатеринбург)
Суяров Д. И., Шилов В. И.	Россия	Институт металлургии УФ АН СССР (г. Екатеринбург)
Hockett J.	Канада	Энергетический факультет университета (г. Оттава)
Thomason P., Fogg B.	США	—
Suzuki H.	Япония	Токийский университет
Bala S., Czajka E.	Польша	Институт черной металлургии (г. Гливице)
Микляев П. Г., Дуденков В. Н., Шур И. А.	Россия	Всесоюзный институт легких сплавов (г. Москва)
Смолин А. П., Выдрин В. Н.	Россия	Челябинский политехнический институт
Spittel T., Hensel A., Spittel M.	Германия	Фрайбергская горная академия
Чичигин В. А., Антошечкин Б. А., Бурдуковский В. Г., Буркин С. П.	Россия	Уральский политехнический институт (г. Екатеринбург)
Fuxa J.	Чехия	Институт черной металлургии (г. Добра)
Соколов Л. Н., Ефимов В. Н., Голдин А. Р.	Украина	Краматорский индустриальный институт

Представляет интерес конструкция пластометра, разработанного в Институте черных металлов г. Добра (Чехия), схема которого показана на рис. 17 [14]. Он включает устройство для испытания на сжатие (А), гидравлический преобразователь (Б), гидропривод (В) и устройство для испытания на кручение. Гидропреобразователь обеспечивает пуск, остановку и достаточно быстрое реверсирование рабочего барабана (маховика). Этот пластометр позволяет проводить

испытания на осадку со скоростью деформации до  $300 \text{ с}^{-1}$ . Программатор в системе управления дает возможность настраивать машину на требуемый закон нагружения или деформации.

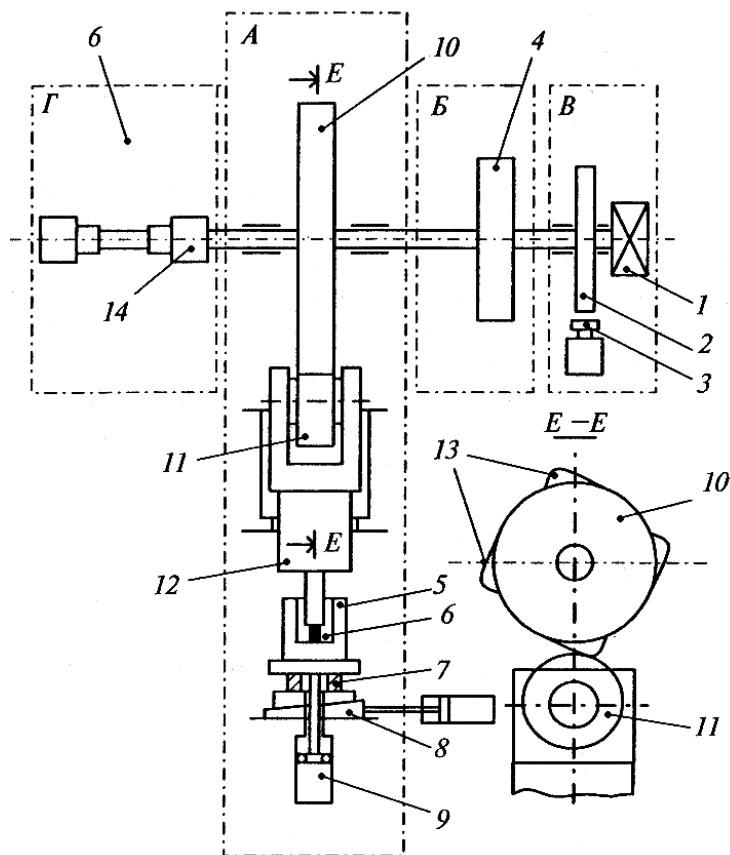


Рис. 17. Схема универсального кулачкового пластометра (г. Добра, Чехия):

- А – блок испытаний на сжатие; Б – гидравлический преобразователь;  
 В – гидропривод установки; Г – блок испытаний на кручение; 1 – двигатель;  
 2 – маховик; 3 – ленточный тормоз; 4 – регулировочный насос; 5 – контейнер;  
 6 – образец; 7 – мессдоза; 8 – клиновое устройство; 9 – гидроцилиндр;  
 10 – рабочий барабан; 11 – ролик; 12 – рабочий плунжер;  
 13 – профилированные кулачки; 14 – захваты для испытаний на кручение

Конструкция пластометра Уралмашзавода (авторы Быков Л.А., Третьяков А.В. и др.) схематично показана на рис. 18 [27]. Привод этого пластометра осуществляется через Г-Д-установку от двигателя постоянного тока ( $N = 18 \text{ кВт}$ ) с плавным регулированием скорости от 50 до 800 об/мин. От двигателя вращение через эластичную муфту и цилиндрический редуктор передается на маховик. Редуктор представляет собой по сути дела коробку скоростей с  $i=1; 2$  и 10. На маховике (барабане) укреплен кулачок со съёмным шаблонным профилем. При испытании с помощью специального фиксирующего устройства осуществляется подъём в рабочее положение кулачка, который приводит в движение плунжер гидравлического механизма.

Рабочая жидкость приводит в движение (вниз) шток исполнительного механизма, на котором установлен захват, удерживающий образец при испытании на растяжение. Нижний шток поршня одновременно выполняет роль бойка для осуществления испытания на осадку. Установка требуемой скорости деформации производится за счет регулирования скорости вращения маховика. Пластометр конструкции УЗТМ (Уральский завод тяжелого машиностроения) является достаточно жесткой машиной (коэффициент жесткости равен 139000 мН/м при испытании на осадку и 82500 мН/м – при испытаниях на растяжение).

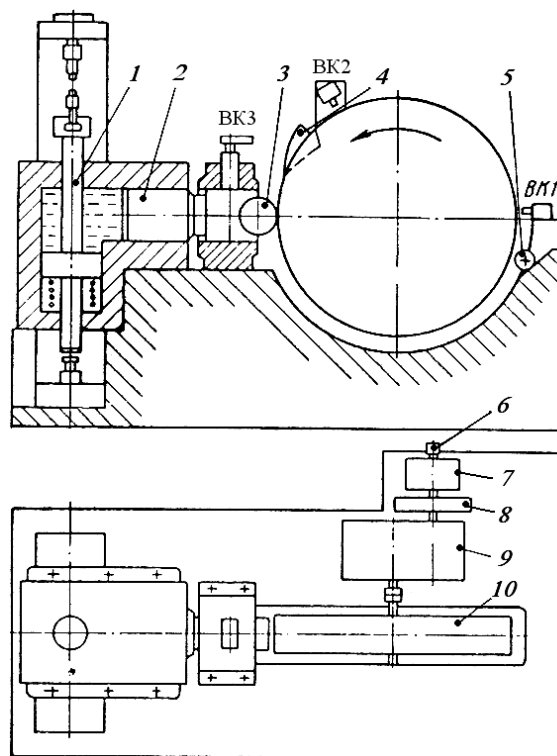


Рис. 18. Схема пластометра конструкции УЗТМ:

- 1 – шток исполнительного механизма; 2 – плунжер; 3 – шток с роликом;  
 4 – рабочий кулачок; 5 – устройство прижима кулачка; 6 – регулятор оборотов;  
 7 – двигатель постоянного тока; 8 – маховик; 9 – редуктор; 10 – барабан

По проекту пластометра, разработанного на Уралмашзаводе, было изготовлено две одинаковых машины, одна из которых установлена в Московском институте стали и сплавов и использовалась для пластометрических испытаний тугоплавких металлов в широком диапазоне температур. Для проведения высокотемпературных испытаний пластометр был дополнительно оснащен вакуумированной камерой, герметизирующей зону деформации образцов. Схема этой камеры приведена на рис. 19 [10]. Камера, состоящая из водоохлаждае-



мого корпуса *1* и загрузочного тамбурного устройства *3*, основанием крепится на штоке нажимного механизма пластометра *2*. Рабочий плунжер жестко связан со штоком *12* пластометра, от которого усилие передается на бойки *11* и на образец *10*. В камере установлена высокотемпературная печь сопротивления с вольфрамовыми нагревателями *8*, закрытая экранами *9* для защиты вакуумного уплотнения от перегрева.

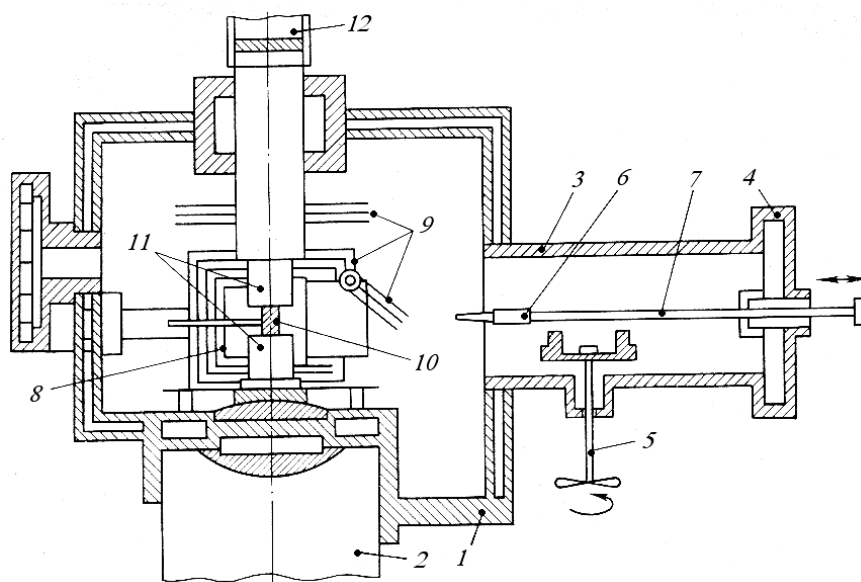


Рис. 19. Схема вакуумной камеры для испытаний на пластометре тугоплавких металлов и сплавов

Один из самых мощных кулачковых пластометров традиционной конструкции (разработчики Суяров Д.И., Шилов В.И., Лель Р.В.) установлен в Институте машиноведения УрО РАН (г. Екатеринбург). В свое время на этом пластометре институтом металлургии УФ АН СССР проведены широкие исследования разупрочнения металлов в паузах между нагружениями при дробной деформации.

Дробное деформирование образцов в автоматическом режиме возможно на кулачковом пластометре конструкции ЧПИ (г. Челябинск), разработанной Смолиным А.П., Выдриным В.Н., Крайновым В.И. и др. Конструкция исполнительного устройства этого пластометра показана на рис. 20 [10].

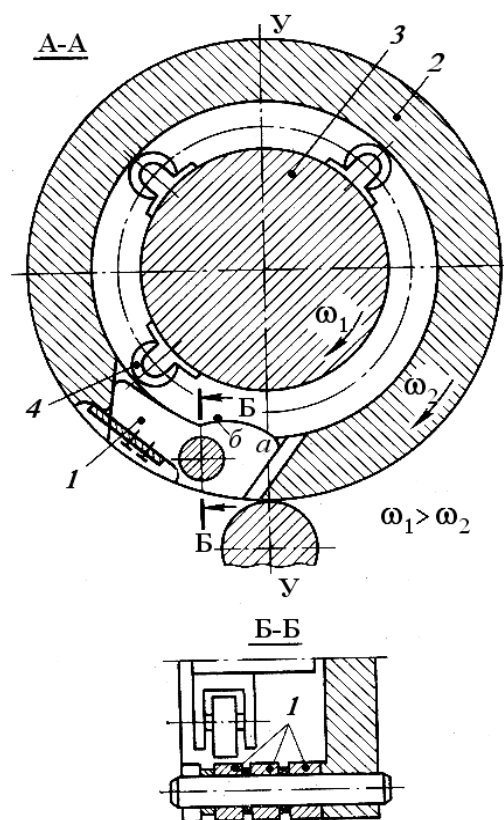


Рис. 20. Схема исполнительного устройства пластометра ЧПИ-2

Рабочие кулачки *1* пластометра, установленные на барабане *2*, приводятся в рабочее положение посредством диска *3*, расположенного соосно внутри барабана и вращающегося с ним в одном направлении, но с несовпадающей угловой скоростью. Ролики *4*, догоняя в определенный момент рабочие кулачки и обкатываясь по участку *а-б*, приводят кулачки в рабочее положение. Ролики взаимно смещены по окружности диска и находятся в параллельных плоскостях вращения и поэтому взаимодействуют только с тем кулачком, который находится в его плоскости вращения. Этот пластометр оснащен закалочным устройством с автоматическим сбрасыванием образца в охлаждающую среду после регламентированной паузы.

Кулачковый пластометр конструкции УПИ им. С.М.Кирова (в настоящее время Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина) создан на базе серийного эксцентрикового пресса [28] и показан на рис. 21.

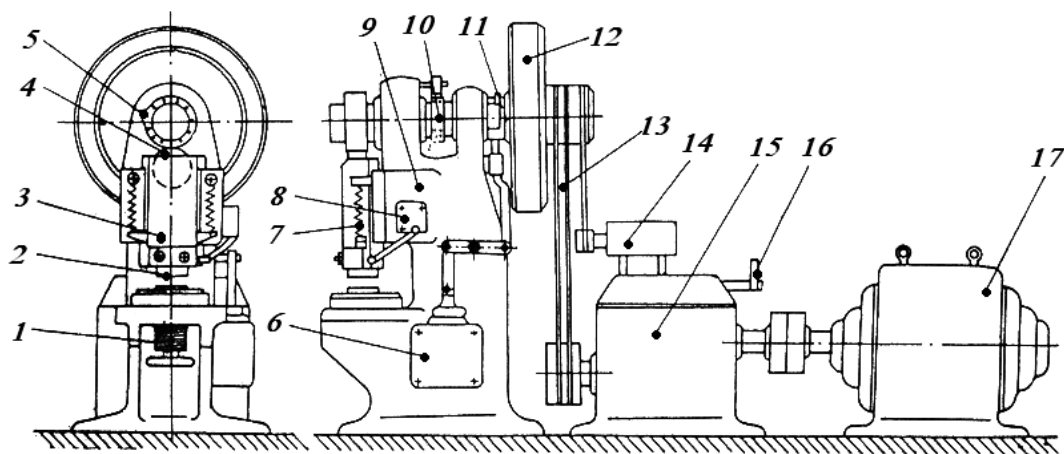


Рис. 21. Кулачковый пластометр кафедры обработки металлов давлением УПИ:

- 1 – регулируемый нижний боек; 2 – верхний боек; 3 – ползун;  
 4 – промежуточный ролик; 5 – кулачковая обойма; 6 – механизм включения муфты; 7 – пружина; 8 – ходограф; 9 – станина; 10 – тормоз; 11 – муфта;  
 12 – маховик; 13 – клиноременная передача; 14 – тахогенератор; 15 – редуктор;  
 16 – рычаг переключения; 17 – электродвигатель

Пластометр снабжен приводом постоянного тока, питаемым от тиристорного преобразователя. Эксцентриковый вал с профилированным кулачком механически соединяется с непрерывно вращающимся маховиком посредством поворотной шпонки. Пластометр используется для испытаний на осадку со скоростью деформации до  $20 \text{ с}^{-1}$ . Максимальное допустимое усилие составляет 70 кН. Для регистрации усилия осадки используется тензометрическая система. Методика проектирования рабочих кулачков для этого пластометра представлена в работе [29].

Кулачковые пластометры используются и при испытаниях на плоское сжатие. Пример такого пластометра приведен на рис. 22 [10].

Подвижный ползун 4 приводится в движение профилированным кулачком 6 посредством ролика 5, установленного на рабочем барабане. Плоский образец 1 осаживается между бойками 2 и 3. Пластометр снабжен мессдозой 8 и ходографом 7. Подобный пластометр использовался для испытания на плоское сжатие алюминиевых образцов.

Достаточно удачной признается [24] конструкция кулачкового пластометра, созданного на Южуралмаше (г. Орск) – рис. 23.

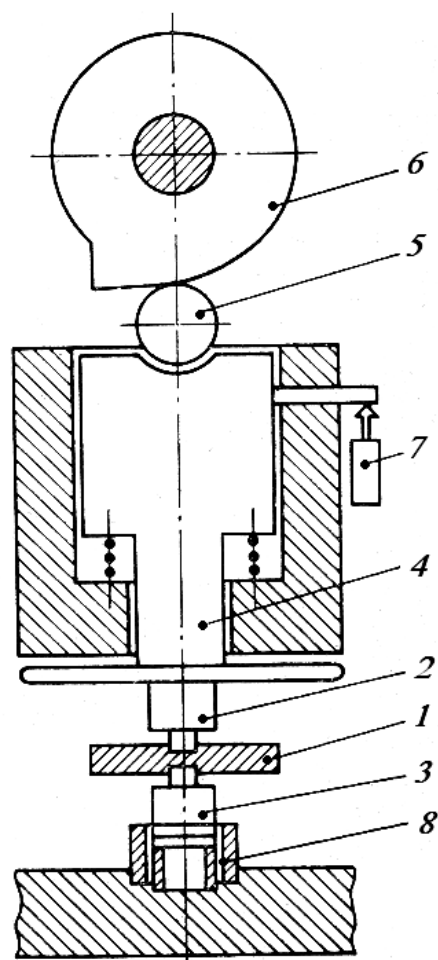


Рис. 22. Схема кулачкового пластометра для плоского сжатия

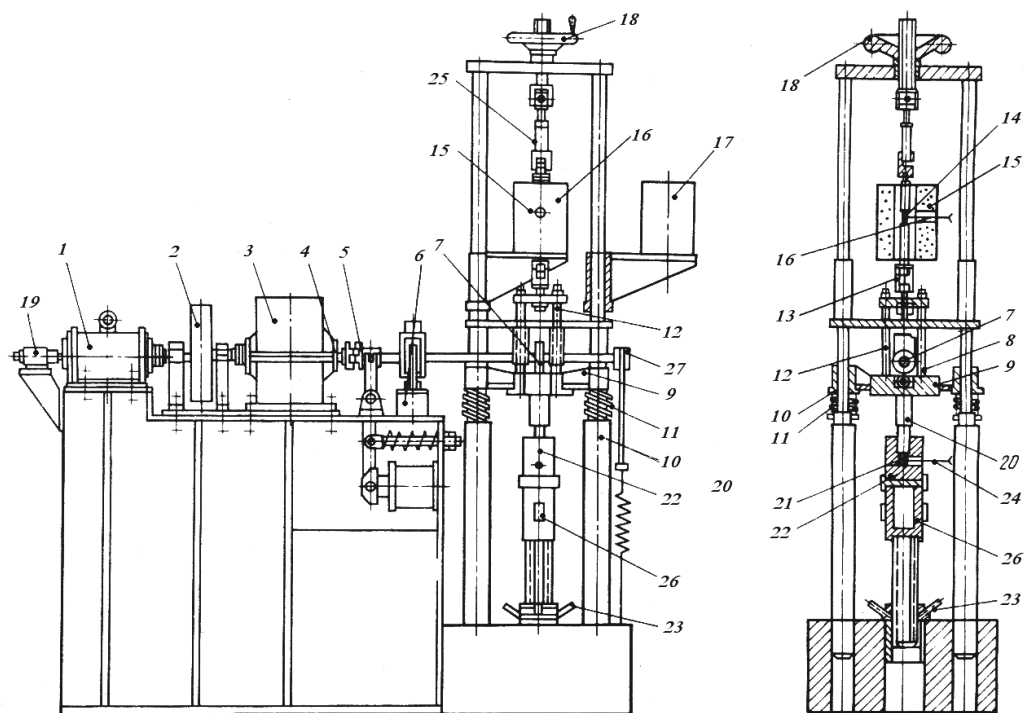


Рис. 23. Кулачковый пластометр конструкции Южуралмашзавода

На валу двигателя 1 устанавливаются маховик 2 и редуктор 3. От вала 4 посредством муфты 5, управляемой электромагнитом 6, вращение передается кулачку 7, который взаимодействует с роликом 8. Ролик вместе с поперечиной 9 перемещается по направляющим 10, сжимая пружины 11. При испытаниях на растяжение поперечина, соединенная рычагом 12 с захватом 13, растягивает образец 14, помещенный в печь 15. Температура контролируется термопарой 16. При испытании на сжатие траверса с пуансоном 20 деформирует образец 21 в контейнере 22. Образцы нагреваются в печи совместно с контейнером 22.

При испытаниях с малой скоростью деформации пластометр позволяет использовать специальное приспособление, включающее кулачок, на который наматывается лента толщиной  $h$ . При этом происходит перемещение ролика с поперечиной на величину  $h$  за каждый оборот кулачка.

Конструкция этого кулачкового пластометра была усовершенствована Институтом черной металлургии Украины (г. Днепропетровск). Схема модернизированного пластометра показана на рис. 24 [24]. Привод 1 осуществляет вращение диска 2. Подпружиненный палец 3 пластометра выполнен в виде штока пневмоцилиндра, сблокированного с промежуточным роликом. Это позволяет управлять положением кулачка 4 и в автоматическом режиме осуществлять испытание с циклическим нагружением и изучать разупрочнение в период пауз.

Исследование процессов упрочнения-разупрочнения при ступенчатом нагружении образцов в температурном интервале от 0 до 1200° С и при скоростях деформации от 0,1 до 10 с<sup>-1</sup> успешно проводятся на пластометре конструкции кафедры ОМД Краматорского индустриального института. Конструкция пластометра, показанная на рис. 25 [24], позволяет после деформации удерживать образец в нагруженном состоянии и тем самым интенсифицировать процесс динамического разупрочнения. Привод осуществляется от линейного электродвигателя с регулируемой скоростью движения сердечника. Пластометр позволяет за счет использования рамы-реверсора проводить испытания как на растяжение, так и на сжатие.

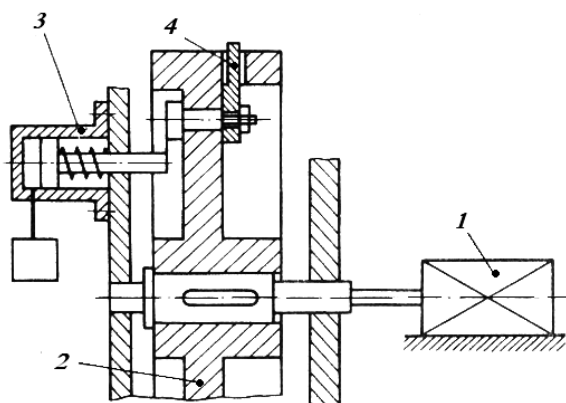


Рис. 24. Схема пластометра Института черной металлургии Украины (Днепропетровск)

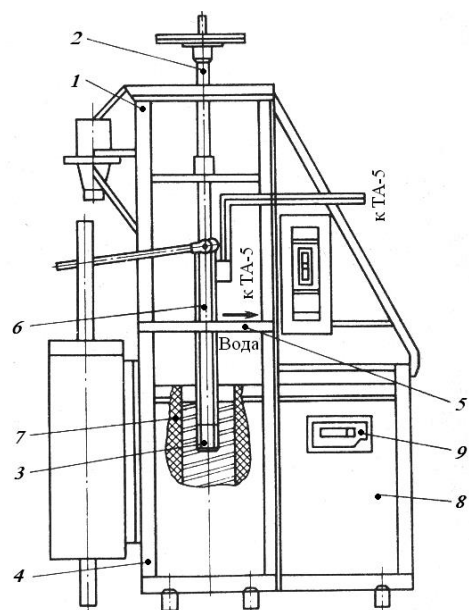


Рис. 25. Конструкция пластометра Краматорского индустриального института

Представляет интерес конструкция кулачкового пластометра, разработанная авторами [12], – рис. 26. Кулачковый вал приводится во вращение от трех электродвигателей постоянного тока, что позволяет проводить пластометрические испытания в широком диапазоне изменения скорости деформации. Двигатели подключаются электромагнитными муфтами. Пластометр достаточно универсален и позволяет проводить испытания на растяжение и сжатие цилиндрических и плоских образцов. Схема настройки пластометра при испытаниях на сжатие показана на рис. 27 [12].

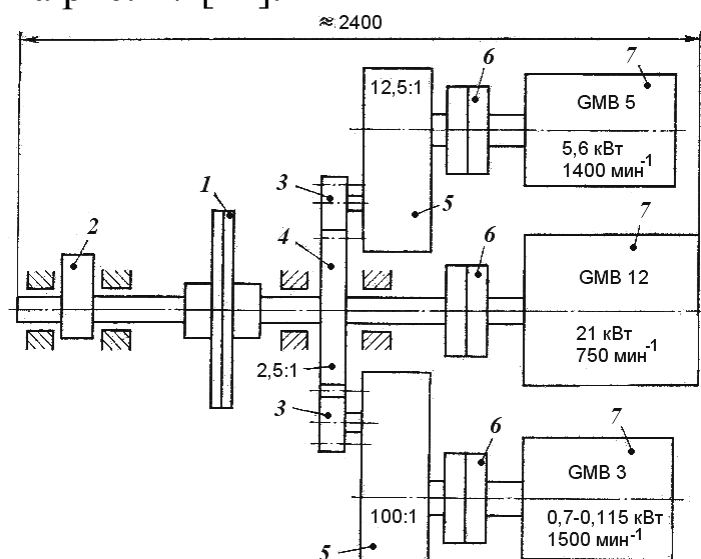


Рис. 26. Кинематическая схема привода кулачкового пластометра усилием 180 кН

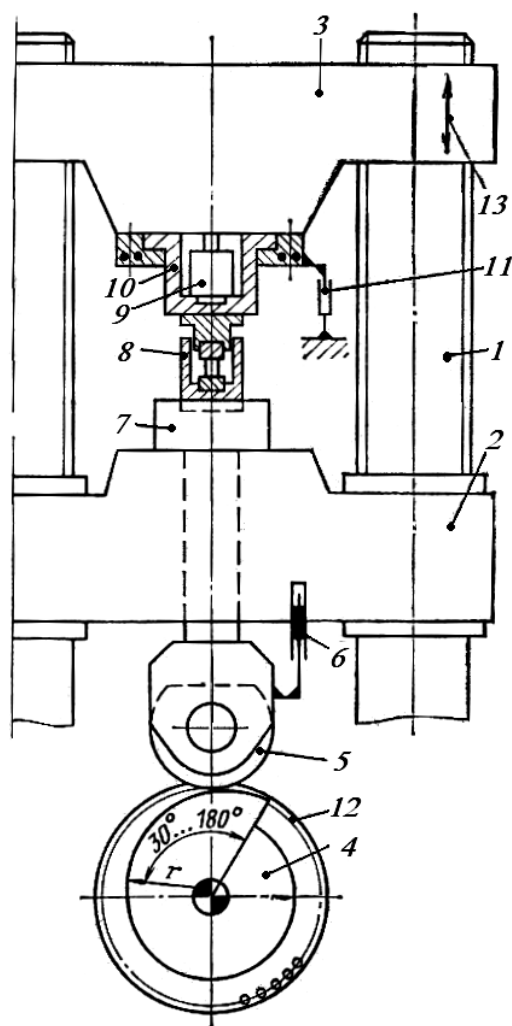


Рис. 27. Кулачковый пластометр усилием 180 кН, приспособленный для испытаний на осадку цилиндрических образцов:

1 – направляющие колонны; 2 – нижняя поперечина; 3 – верхняя поперечина; 4 – кулачок (может иметь до десяти ступеней); 5 – выфрезерованный ролик, осуществляющий кинематическую связь с кулачком; 6 – индуктивный датчик перемещения; 7 – подставка для контейнера с образцом; 8 – контейнер для нагрева образца; 9 – мессдоза; 10 – водоохлаждаемый кожух мессдозы; 11 – устройство для измерения люфта и удлинения колонн; 12 – устройство для измерения угла и ускорения; 13 – перемещение (регулируется маховиком – нажимным винтом)

При проведении испытаний на растяжение закрепленный с одной стороны образец растягивается по мере подъема кулачка при одинаковых кинематических условиях. При этом используется дополнительный подвижный зажим. Для осуществления ступенчатости нагружения образцов как при испытаниях на осадку, так и на растяжение применен многоступенчатый кулачок, который за счет профилирования впадин между выступами позволяет проводить испытания как с полной разгрузкой образца в паузах между нагружениями, так и

сохранять нагрузку на образце до начала следующего этапа деформирования. Недостатком применения таких кулачков при проведении ступенчатых испытаний следует считать реализацию всего цикла нагружений за один оборот кулачкового вала. Известно, что скорость деформации и длительность пауз связаны определенными соотношениями и эти соотношения могут варьироваться в достаточно узких пределах. Высокая скорость деформации может сопровождаться кратковременными паузами, низкая скорость – с длительными паузами.

Несомненным достоинством используемых на этом пластометре кулачков является возможность управления параметрами напряженного состояния образца в период пауз. Это важно, поскольку напряженное состояние в паузах влияет на динамику разупрочнения и, следовательно, на величину сопротивления деформации.

Богатый экспериментальный материал по определению сопротивления деформации легких металлов и их сплавов в широком диапазоне варьирования температуры и скорости деформации накоплен в результате испытаний на осадку, выполненных на кулачковом пластометре конструкции Всесоюзного института легких сплавов (ВИЛС). Конструкция этого пластометра показана на рис. 28 [13].

Пластометр, предназначенный для пластометрических испытаний на сжатие и растяжение, включает в свой состав нагружающую систему, привод и пневмосистему. Общая конструкция мало отличается от предыдущей. Привод пластометра электромеханический с управлением скоростью вращения кулачкового вала с помощью коробки передач и тиристорного преобразователя. Пластометр рассчитан на максимальное усилие 0,1 МН и скорость деформирования от 0,5 до 35 м/мин. Устанавливаемая на пластометр муфельная печь позволяет проводить испытания при температурах от 20 до 800<sup>0</sup>С. Усилие растяжения и сжатия измеряется тензометрической мессдозой и регистрируется с помощью прибора диаграммной записи.



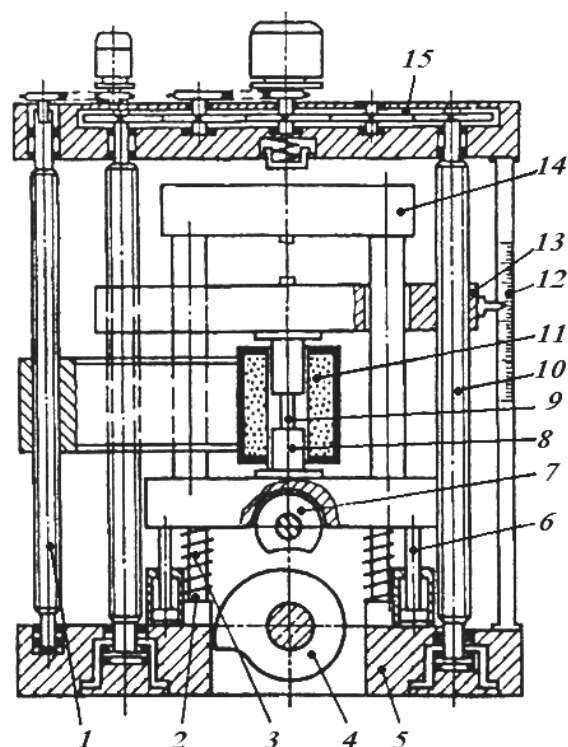


Рис. 28. Принципиальная схема пластометра УИДИН-1:

1 – винт подъема печи; 2 – неподвижный упор; 3 – пружина; 4 – кулачок;  
 5 – нижняя траверса; 6 – пневматический цилиндр; 7 – ролик; 8 – инструмент  
 для испытаний; 9 – образец; 10 – винт установочной траверсы; 11 – печь для  
 нагрева образцов; 12 – линейка; 13 – установочная траверса;  
 14 – ползун; 15 – верхняя траверса

## 4.2. Торсионные (ротационные) пластометры

Машины, применяемые для пластометрических испытаний на кручение, называются торсионными пластометрами и практически все реализуют упруго-пластическое кручение цилиндрических образцов при сохранении постоянной за время деформирования скорости сдвиговой деформации  $\dot{\gamma}$ . В табл. 6 [12] приведены области и условия применения торсионных пластометров.

Практически все разработанные торсионные пластометры имеют типовую конструкцию, схематично показанную на рис. 29 [12]. Сплошной или полый цилиндрический образец с зажимными головками закрепляется между подвижным и неподвижным захватами. При испытаниях при высоких температурах образец располагается в трубчатой печи индукционного нагрева или нагрева сопротивлением. Печи часто снабжаются системой подачи защитного газа для

Таблица 6

## Области применения пластометров кручения

Параметр	Диапазон применения
Образцы Размеры образца Температура деформации Скорость вращения Привод	Сплошные и полые $D(3-18) \times (5-100)$ мм $l/d_0 = 1-10$ Максимальная 1400°С 0,01—6000 мин <sup>-1</sup> (бесступенчато или ступенчато) Трехфазный двигатель с промежуточным переключателем скоростей или гидромотор, максимальная мощность привода 50 кВт
Муфта	В зависимости от скорости вращения кулачковая, центробежная, электромагнитная или винтовая
Нагрев образца	Прямой и косвенный нагрев сопротивлением, индукционный, инфракрасным излучением с высокой плотностью энергии
Измерение температуры	Термопара, обычный или специальный пирометр
Измерение скорости вращения	Электрический или электронный счетчик, получающий импульс от электропроводных и неэлектропроводных сегментов, расположенных на зажимах образца
Измерение крутящего момента	Траверса или пружина кручения
Охлаждение образцов	Водой или водно-воздушной смесью, отчасти прямо в печи при косвенном нагреве сопротивлением или в индукторе при индукционном нагреве
Атмосфера печи	Воздух или защитный газ (аргон, водород)

предотвращения окисления рабочей поверхности образцов. Для привода вращения подвижного захвата применяются регулируемые электромеханические или гидравлические приводы мощностью от 2 до 50 кВт. Приводы современных торсионных пластометров обеспечивают скорости вращения захвата от 75 до 1750 об/мин. Между выходным валом привода и зажимным патроном устанавливается электромагнитная муфта с высоким быстродействием, поскольку малое время включения и выключения позволяет реализовать заданные программы испытаний. На неподвижном захвате монтируется торсиометр, измеряющий крутящий момент. Информация либо используется для построения диаграммы испытания, либо поступает в ЭВМ для первичной обработки.

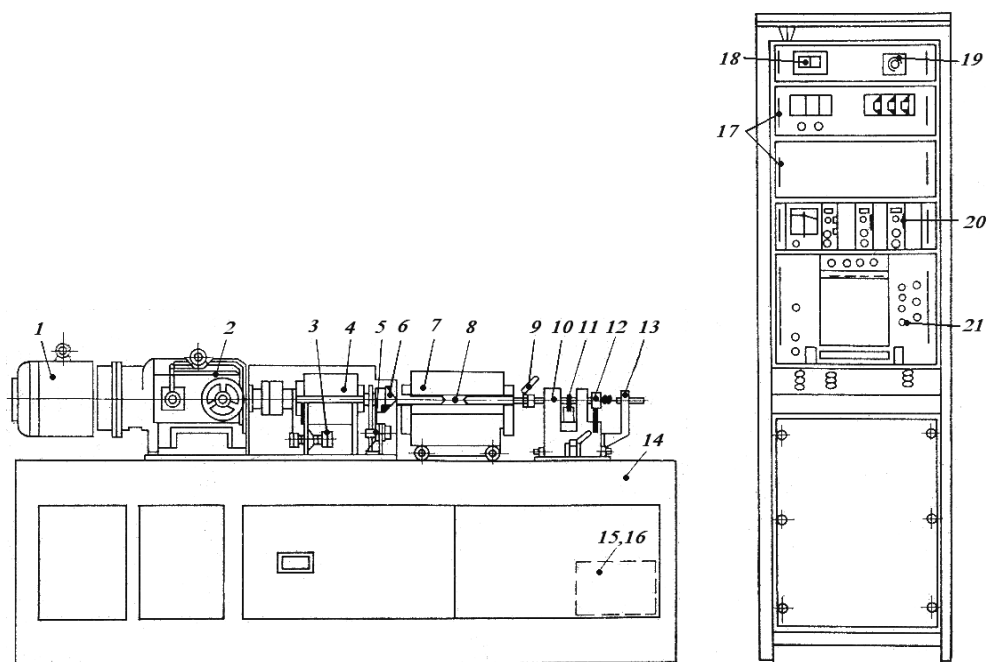


Рис. 29. Схема пластометра кручения:

- 1 – электродвигатель привода; 2 – гидродвигатель; 3 – счетчик числа оборотов;  
 4 – муфта, комбинированная с тормозом; 5 – датчик числа оборотов;  
 6 – вращающийся захват; 7 – нагревательное устройство; 8 – образец;  
 9 – неподвижный захват; 10 – плавающий подшипник; 11 – устройство для измерения крутящего момента; 12 – устройство для измерения осевого усилия;  
 13 – датчик осевой деформации; 14 – рама станины; 15, 16 – устройство регулировки температуры и трансформатор нагревательного устройства;  
 17 – числовой индикатор числа оборотов; 18 – числовой индикатор;  
 19 – ручка регулировки температуры; 20 – кнопка возврата; 21 – самописец

Торсионные пластометры появились значительно позднее кулачковых, однако в последние годы это направление в технике пластометрических исследований активно развивается. Некоторые данные о созданных крутильных пластометрах приведены в книге [14] и в табл. 7. Первые установки создавались, как правило, на базе металлорежущего оборудования (чаще всего на базе токарных станков) и снабжались необходимыми устройствами для нагрева образцов и замера крутящих моментов. Первая серийная конструкция торсионного пластометра появилась в Институте металлургии железа в г. Гливице (Польша). Внешний вид этого пластометра показан на рис. 30 [14]. Машина мало отличается от типовой, показанной на рис. 29. Единственной особенностью является наличие охлаждающего устройства для закалки образцов непосредственно после деформации кручения.

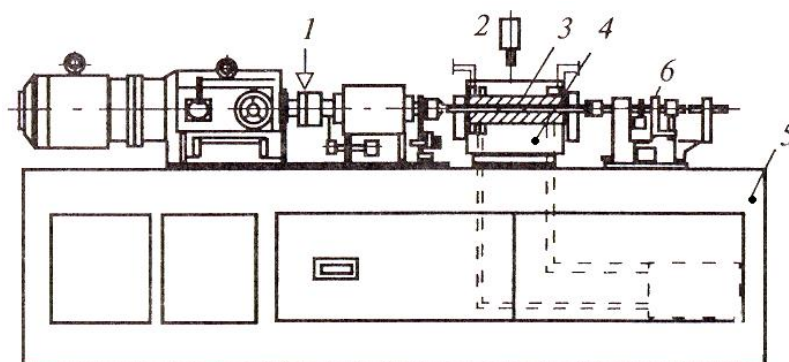


Рис. 30. Торсионный пластометр модели PS-A/78, установленный в IMZ (Гливицы, Польша): 1 – система управления параметрами испытаний; 2 – пирометр; 3 – образец в герметичной камере; 4 – муфельная электропечь; 5 – станина; 6 – система тензометрической записи

Таблица 7

### Данные о торсионных пластометрах

Авторы	Страна	Институт, завод, город
Вебер К.	Германия	Фрайбергская горная академия
Перетяtko В. Н., Обищенко С. А.	Россия	Сибирский металлургический институт (г. Новокузнецк)
Драстик Ф., Эльфмарк И.	Чехия	Витковицкий завод (г. Острава)
Пелк И.	Чехия	Институт технологии машиностроения (г. Прага)
Дуглас С., Алтан В.	Англия	Лондонский университет, факультет металлургии и материаловедения
Серийная модель НРиА	Польша	ИЧМ (г. Гливице), з-д в г. Бытом
Жучин В. Н., Никитин Г. С., Шварцбарт Я. С.	Россия	Электростальский металлургический завод (г. Электросталь)
Галкин А. М., Бровман М. Я.	Россия	Московский государственный институт стали и сплавов, НИИПТмаш (г. Краматорск)
Серийная модель системы «Setaram» (лицензия IRSID)	Франция	IRSID (г. Лион)
Серийная модель марки TCO1	Франция	Adamel Lhomargy, Ivry-s/Seine

В МИСиС (Московский институт стали и сплавов) уже давно эксплуатируется торсионный пластометр, созданный на базе токарно-го станка с числовым программным управлением, позволяющий проводить испытания на кручение со скоростями деформации от 0,1 до 15 с<sup>-1</sup> на стандартных образцах диаметром от 4 до 10 мм. Схема установки конструкции МИСиС показана на рис. 31 [14].

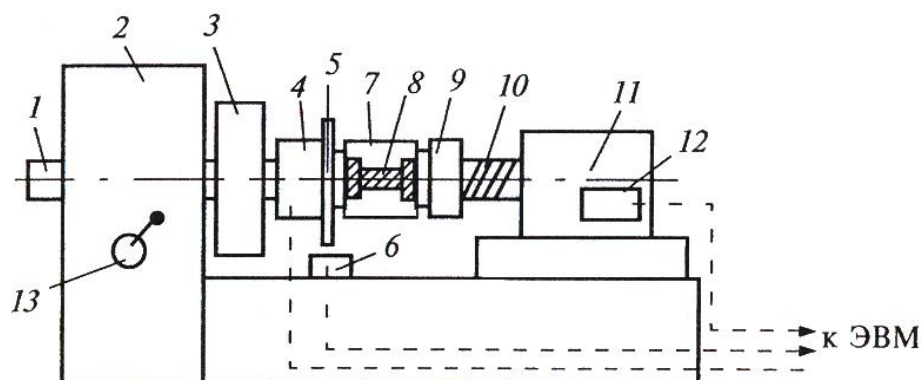


Рис. 31. Схема пластометрической установки АПУ конструкции МИСиС-НИИПТмаш: 1 – вал пластометра; 2 – станина; 3 – маховик; 4 – электромагнитная муфта; 5 – зубчатое колесо; 6 – фотодатчик ДФ-3; 7 – муфельная электропечь; 8 – образец; 9 – неподвижный захват; 10 – мессдоза; 11 – задняя бабка; 12 – предусилитель сигнала; 13 – переключатель передач редуктора

Замер крутящих моментов осуществляется с помощью тензодатчиков, а скорости вращения активного захвата – фотодатчиком типа ФД-3. Установленная на пластометре электропечь сопротивления оснащена цифровым пирометром ТТЦ-1.

Авторы книги [14] видят перспективу дальнейшего совершенствования конструкций пластометров кратковременных статических и псевдостатических испытаний на базе применения сервогидравлических приводов с управлением от ЭВМ. На рис. 32 показана структура такого пластометра, предназначенного для статических и динамических испытаний на плоское сжатие со скоростью деформации до  $400 \text{ с}^{-1}$ .

Эта установка позволит моделировать дробное нагружение с числом циклов до 40 и минимальной паузой между циклами нагружения до 0,05 с. Программа испытаний контролируется ЭВМ. Образцы регламентировано нагреваются в индукционной печи. Установка также предусматривает возможность быстрого охлаждения и фиксации структуры сплавов.

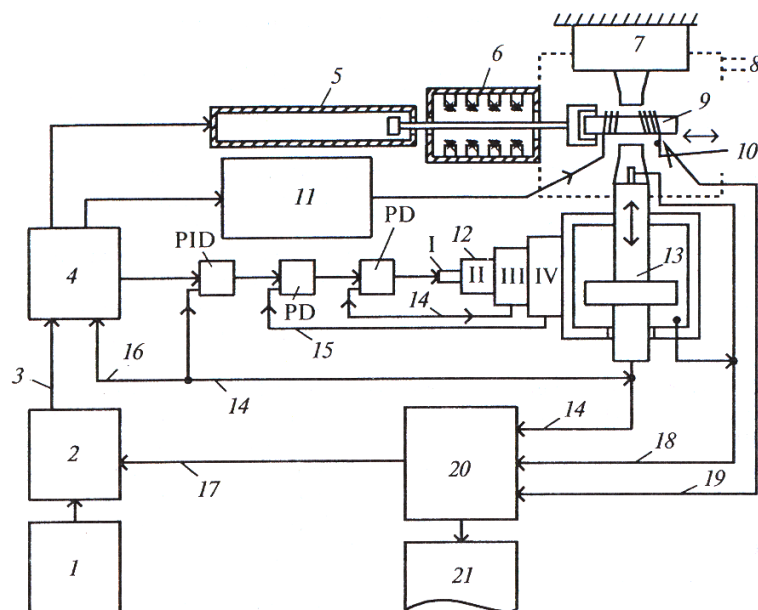


Рис. 32. Схема установки для моделирования процесса горячей деформации: 1 – программа обжати (до 40 проходов); 2 – ЭВМ по подготовке данных, не включенная в технологический процесс; 3 – программа управления; 4 – управляющая ЭВМ, включенная в технологический процесс; 5 – пневматический манипулятор; 6 – камера охлаждения; 7 – неподвижный верхний инструмент; 8 – подача защитного газа; 9 – образец (200x100x200 мм); 10 – нагреватель; 11 – установка индукционного нагрева; 12 – сервоклапаны I-IV; 13 – рабочий цилиндр; 14 – измеритель; 15 – линия регулирования; 16 – линия контроля; 17 – блок корректировки программы; 18 – измеритель усилия; 19 – измеритель температуры; 20 – линия сбора данных для ЭВМ; 21 – система обработки данных; PID – пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор; PD – пропорциональный регулятор с воздействием по производной

### 4.3. Пластометр конструкции УГТУ-УПИ

Кроме универсальных испытательных машин, кулачковых и торсионных пластометров право на существование имеют другие типы пластометров, где постоянство скорости деформации достигается не за счет профилированного кулачка, а, например, посредством функциональной механической передачи. Следует отметить, что кулачковые пластометры, у которых кулачок устанавливается в тело барабана, а радиус кривизны кулачка совпадает с радиусом барабана, не обеспечивают желаемое постоянство скорости деформации в течение всего акта деформирования. Это, в частности, показано в работе [29], где представлен подробный анализ режимов работы кулачковых пластометров. Авторы работы провели исследования по определению профиля кулачка при следующих условиях: скорость деформации по-



стоянна; скорость перемещения инструмента постоянна; скорость деформации и скорость перемещения инструмента являются функциями от угла поворота маховика от начального момента деформации. Авторы считают, что лучшие результаты дает кулачок, профилированный по уравнению, полученному из условия постоянства скорости деформации. Однако и в этом случае сложно поддерживать скорость деформации постоянной (при любых скоростях деформации), поскольку в момент испытания некоторая часть кинетической энергии маховика расходуется на работу деформации (вплоть до полной остановки маховика). Чтобы обеспечить режим нагружения с минимальными отклонениями от заданной скорости деформации, авторы рекомендуют варьировать начальные размеры деформируемого образца.

Многие сплавы алюминия [13], а также магний и его деформируемые сплавы (рис. 33) малочувствительны по  $\sigma_s$  к степени деформации, но проявляют существенное скоростное упрочнение.

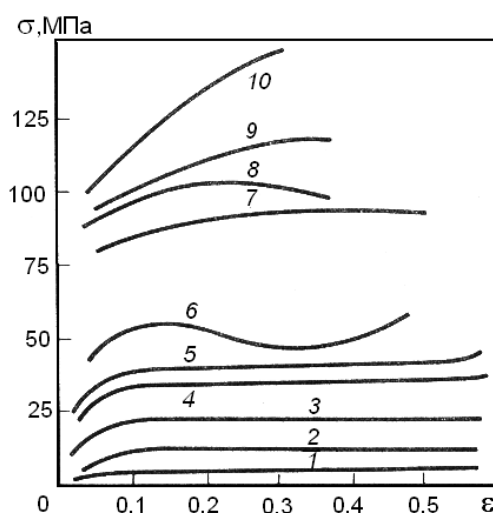


Рис. 33. Графики функций  $\sigma(\epsilon)$  для Mg [24]

Для этих сплавов приходится во время испытаний особенно тщательно стабилизировать  $\dot{\epsilon}$  в течение всего процесса осадки образца. Даже неизбежный в этих испытаниях (называемых изотермическими) деформационный разогрев и влияние контактного трения дают меньшую ошибку в определении  $\sigma_s$ , чем нестабильность скорости деформации, определяемая чаще всего характеристиками испытательной машины [32]. Постоянства скорости деформации добиваются либо на ротационных пластометрах, либо на программно управляемых испытательных машинах. Первые в основном используются при

испытаниях в диапазоне скоростей деформации  $1 \dots 400 \text{ с}^{-1}$ , вторые –  $0,001 \dots 1 \text{ с}^{-1}$ .

Приходится признать, что практически все механические пластометры не позволяют определять  $\sigma_s$  при малых скоростях деформации ( $0,001 \dots 0,1 \text{ с}^{-1}$ ) из-за резкого торможения маховика во время обжатия образца. Это в равной степени относится и к пластометру, построенному на базе серийного эксцентрикового пресса [28]. Автоматизированные испытательные машины, в основном зарубежного производства, с программным управлением функций нагружения не окупаются в производственных условиях и не доступны большинству научных подразделений вузов и лабораторий институтов РАН.

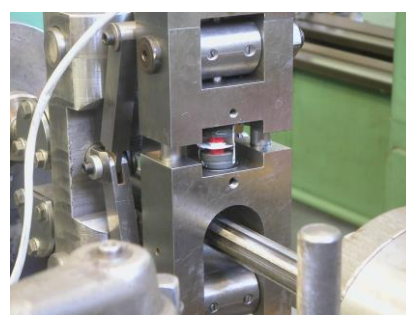
На кафедре обработки металлов давлением Уральского государственного технического университета-УПИ разработана и изготовлена при участии ОАО «КУМЗ» (Каменск-Уральский металлургический завод) новая конструкция пластометра, снабженная системой автоматизированного сбора и обработки информации (рис. 34). Пластометр прост в изготовлении и монтируется на универсальном токарном станке, в частности на 1А616. Позволяет проводить высокотемпературные испытания на сжатие и растяжение образцов в диапазоне скоростей деформации от  $0,001$  до  $10 \text{ с}^{-1}$ , что актуально при изучении свойств высоколегированных алюминиевых и магниевых сплавов. Схема пластометра приведена на рис. 35. Конструкция включает в себя двухстоечную станину 1, жестко закрепляемую на продольных направляющих станины токарного станка 2. На стойках станины 1 шарнирно установлены два поворотных коромысла 3 и 4, на одном плече которых в подшипниковых опорах закреплены опорные ролики



*а*



*б*



*в*

Рис. 34. Внешний вид пластометрической установки, смонтированной на универсальном токарном станке: *а* – установка пластометра на станине токарного станка; *б* – взаимодействие коноида с роликами; *в* – установка образца между бойками



5, а на другом плече – шарнирно закреплены ползуны 6 и 7 с возможностью вертикального перемещения вдоль направляющих 8, роль которых в конкретной конструкции выполняют направляющие колонки.

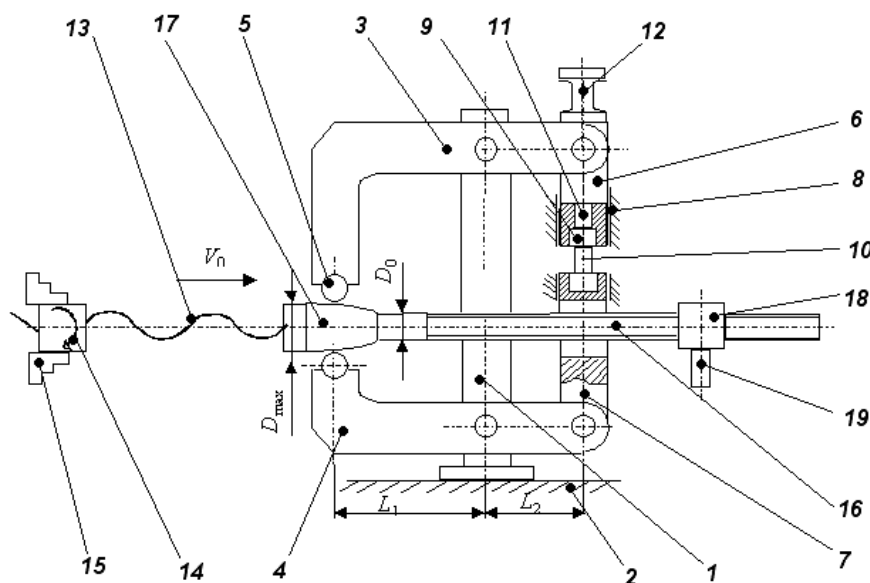


Рис. 35. Конструктивная схема пластометра

В корпусах ползунов смонтированы теплоизолированные жаропрочные бойки 9, между которыми при испытании устанавливается образец 10. Верхний боек 9 имеет осевую подвижность, которая используется для предварительного прижима образца и для передачи усилия деформирования посредством толкателя 11 тензометрическому силоизмерителю (мессдозе) 12. В горизонтальном положении по оси токарного станка установлен ходовой винт 13 с гайкой 14, зажатой в губках токарного патрона 15. К правому концу винта 13 соосно и жестко крепится шлицевый вал 16, на цилиндрической проточке которого по скользящей посадке устанавливается и фиксируется буртом вала профилированная втулка-коноид 17. Шлицевый вал проходит через раствор роликов 5, между стойками станины 1, сквозь расточку корпуса 7 и шлицевую муфту 18, снабженную управляемым фиксатором 19.

При проведении испытаний установка работает следующим образом. В исходном положении (рис. 34, а) коноид 17 смещен влево от плоскости установки роликов 5 и ролики упираются в гладкую цилиндрическую поверхность вала 16 под действием пружин (на рис. 35 не показаны), поворачивающих коромысла 3 и 4 и разводящих бойки 9.

Цилиндрический образец 1 (рис. 36) с исходными размерами  $H_0$  и  $d_0$  ( $H_0/d_0 \leq 2,5$ ) помещается между жаропрочными бойками 2, которые центрируются асбестовым кожухом 3, стянутым проволочными бандажами 4. Для фиксации осевого положения образца используется асбестовое кольцо 5. В кожухе 3 монтируется керамическая трубка 6, через которую вводится термopара 7 до касания спаем боковой поверхности образца. Вся сборка образца нагревается в печи до температуры испытания и помещается между бойками (рис. 34, в) пластометра. Поворотом корпуса мессдозы 12 осуществляется предварительное сжатие сборки образца между бойками 9. Патрон токарного станка приводится во вращение с регламентированной скоростью. При этом до фиксации муфты 18 винт 13 и вал 16 с коноидом вращаются вместе с гайкой 14. После ввода фиксатора 19 винт 13 без вращения перемещается вправо и коноид 17 вводится между роликами 5 (рис. 34, б), поворачивая коромысла 3 и 4 и осуществляя осадку образца по заданному формой коноида закону. После завершения деформации реверсом привода станка коноид переводится в исходное положение.

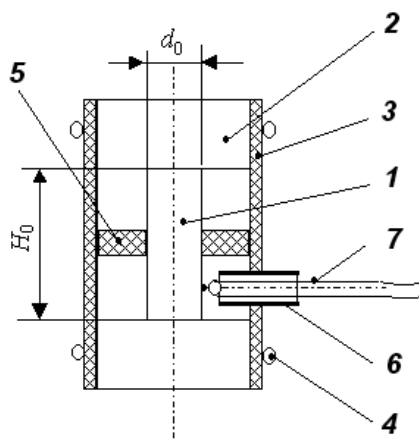


Рис. 36. Конструкция сборки образца для горячих испытаний

Профиль рабочей поверхности коноида определяется условием постоянства скорости деформации при осадке с учетом жесткости механической части установки.

Если точка А (рис. 37) опоры подвижного бойка перемещается по поверхности коноида  $y = f(x)$ , имеющего постоянную осевую скорость  $V_0$ , то скорость перемещения бойка

$$V = V_0 \frac{d y}{d x} . \quad (1)$$

Мгновенная скорость деформации

$$\dot{\varepsilon} = \frac{V}{H} = \frac{V}{H_0(1 - \varepsilon_k)},$$

где  $\varepsilon_k = \Delta H_k / H_0$  – конечная (заданная) относительная степень деформации.

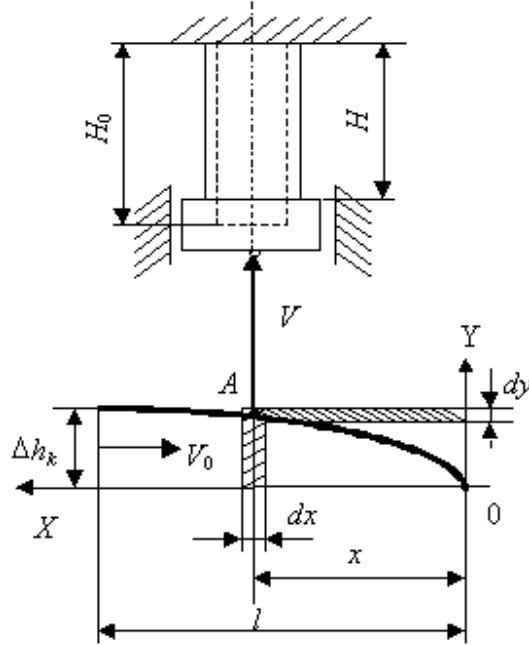


Рис. 37. Расчетная схема профиля инструмента при точечном контакте

Время, затраченное на конечное деформирование образца  $\Delta H_k$ , равно

$$\tau_k = \int_0^{\Delta H_k} \frac{dy}{\dot{\varepsilon}(H_0 - y)} = -\frac{1}{\dot{\varepsilon}} \int_0^{\Delta H_k} \frac{d(H_0 - y)}{H_0 - y} = \frac{1}{\dot{\varepsilon}} \ln \frac{1}{1 - \varepsilon_k}.$$

При постоянстве скорости коноида  $V_0$   $\tau_k = l/V_0$ , где  $l$  – длина коноида.

Отсюда 
$$V_0 = l \dot{\varepsilon} / \ln \frac{1}{1 - \varepsilon_k}. \quad (2)$$

Уравнение образующей коноида  $y=f(x)$  находится из решения дифференциального уравнения (1)

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}(H_0 - y) &= V_0 \frac{dy}{dx}; \\ \frac{\dot{\varepsilon}}{V_0} x &= -\int \frac{d(H_0 - y)}{H_0 - y} + c. \end{aligned}$$

Начальное условие  $x|_{y=0} = 0$  дает  $c = \ln H_0$ .

Следовательно, 
$$y = H_0 \left( 1 - e^{-\frac{\dot{\varepsilon}}{V_0} x} \right),$$

или после подстановки значения  $V_0$

$$y = H_0 \left( 1 - e^{-\frac{x}{l} \ln \frac{1}{1-\varepsilon_k}} \right) = H_0 \left[ 1 - \left( \frac{1}{1-\varepsilon_k} \right)^{-\frac{x}{l}} \right].$$

Таким образом, скорость перемещения бойка при движении коноида

$$V = V_0 \frac{h_0}{l} \left( \frac{1}{1-\varepsilon_k} \right)^{-\frac{x}{l}} \ln \left( \frac{1}{1-\varepsilon_k} \right).$$

Условие несамоторможения опоры бойка на поверхности коноида представимо в виде

$$\frac{H_0}{l} \left( \frac{1}{1-\varepsilon_k} \right)^{-\frac{x}{l}} \ln \left( \frac{1}{1-\varepsilon_k} \right) \leq \mu, \quad (3)$$

где  $\mu$  – коэффициент трения.

При проектировании коноида и, в частности, при выборе его длины  $l$  проверка условия (3) осуществляется исходя из реальных условий трения на поверхности коноида. В рассматриваемой конструкции – это трение качения роликов 5 (рис. 35) по образующей коноида 17.

В реальной конструкции пластометра скорость движения бойка  $V$  связана со скоростью радиального смещения ролика  $V'$  (рис. 38) соотношением

$$V = V' \frac{L_2}{L_1} = V' K.$$

Скорость деформации 
$$\dot{\varepsilon} = \frac{V' K}{h_0 (1-\varepsilon_k)}.$$

Профиль коноида при использовании роликовых опор зависит от диаметра роликов  $2r$  (рис. 38). В выбранной системе координат уравнение траектории оси ролика при его качении по образующей коноида имеет вид

$$y = h_0 \left[ 1 - (1-\varepsilon_k)^{-\frac{x}{l}} \right] + r,$$

а уравнение образующей рабочей поверхности коноида можно записать следующим образом:

$$y = h_0 \left[ 1 - (1 - \varepsilon_k) \frac{x-r}{l} \sin \varphi \right] + r(1 - \cos \varphi), \quad (4)$$

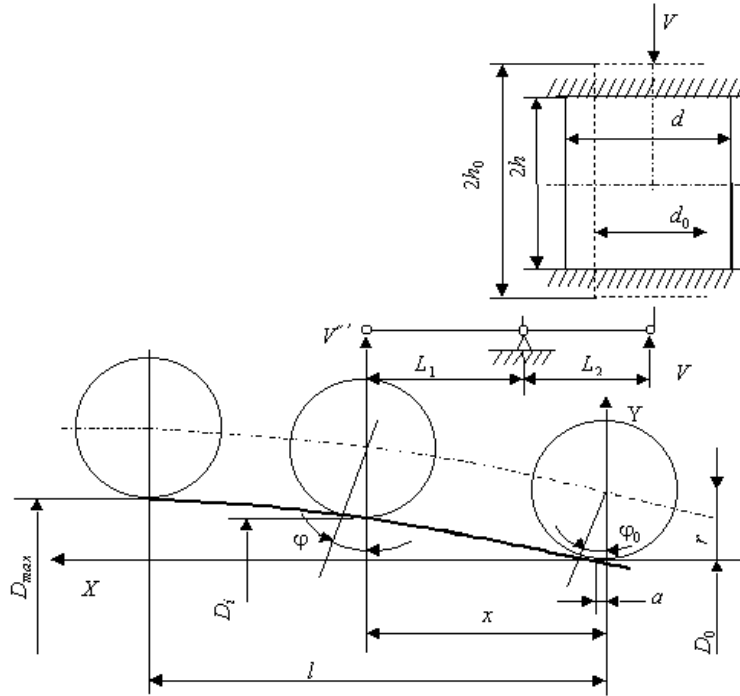


Рис.38. Расчетная схема пластометра

где  $\varphi = \arctg \left[ -\frac{h_0}{l} (1 - \varepsilon_k) \frac{x}{l} \cdot \ln(1 - \varepsilon_k) \right]$ .

До начала деформации ролик катится по образующей цилиндра диаметром  $D_0$  и касается рабочей поверхности коноида, описываемой уравнением его образующей (4), в точке, определяемой угловой координатой  $\varphi_0$ .

Если тело коноида заключено между сечениями  $x = 0$  и  $x = l$ , то на коноиде предусматривается цилиндрическая часть диаметром  $D_0$  и длиной  $a$  (рис. 38), которая может быть найдена численно из уравнения

$$r = r \cos \varphi_1 - h_0 \left[ 1 - (1 - \varepsilon_k) \frac{a-r}{l} \sin \varphi_1 \right], \quad (5)$$

где  $\varphi_1 = \arctg \left[ -\frac{h_0}{l} (1 - \varepsilon_k) \frac{a}{l} \ln(1 - \varepsilon_k) \right]$

Для построения чертежа коноида рассчитываются его диаметры в реперных точках с шагом  $S$ , при этом

$$S = \frac{l - a}{n}, \quad (6)$$

где  $n$  – число реперных точек по длине коноида.

Таким образом,  $i$ -й диаметр определяется выражением

$$D_i = D_0 + \left[ 1 - (1 - \varepsilon_k) \frac{S \cdot i}{l} - \frac{r}{l} \sin \varphi \right] + r(1 - \cos \varphi), \quad (7)$$

где  $\varphi = \arctg \left[ -\frac{h_0}{l} (1 - \varepsilon_k) \frac{S \cdot i}{l} \ln(1 - \varepsilon_k) \right]$ .

Для уменьшения ошибки в достижении заданной конечной степени деформации  $\varepsilon_k = \frac{(D_{\max} - D_0)k}{2h_0}$  при расчете  $D_i$  целесообразно

учитывать упругую деформацию элементов конструкции пластометра и в первую очередь изгиб коромысел. В частности, при определении  $\sigma_s$  при горячей деформации высокопрочных сплавов Al и Mg корректировка профилей коноидов проводилась исходя из свойств стали 40 (ГОСТ 1050-78) при температуре до 500<sup>0</sup>C и  $\dot{\varepsilon} = 0,01 \text{ c}^{-1}$  [25].

При проведении испытаний  $D_0$  рассматривается как неизменный для данного пластометра конструктивный параметр. Скорости осевого перемещения коноида  $V_0 = N S_b$ , где  $N$  – частота вращения ходового винта,  $S_b$  – шаг резьбы, задаются дискретно в соответствии с набором скоростей токарного станка.

По программе экспериментов задаются значения  $\varepsilon_k$ ,  $\dot{\varepsilon}$  и температуры нагрева заготовок. После задания  $N$  и определения  $V_0$  по формуле (2) рассчитывается длина коноида  $l$ . Из уравнения (5) методом последовательных приближений находится  $a$ , а после назначения  $n$  по формуле (6) – шаг  $S$ . Затем по формуле (7) определяются диаметры коноида  $D_i$  в  $n + 1$  реперных точках, которые затем корректируются по величине упругой деформации элементов конструкции пластометра с получением исполнительных размеров  $D'_i$ .

В табл. 8 приведены рассчитанные размеры коноидов для исследования сопротивления деформации в диапазоне  $\varepsilon$  от 0,1 до 0,35 при скорости деформации  $\dot{\varepsilon} = 0,02$  на цилиндрических образцах диаметром  $d_0 = 10$  мм и высотой  $H_0 = 15$  мм. Для всех коноидов  $D_0 = 30$  мм,  $r = 20$  мм и  $l = 70$  мм. Пластометр (рис. 35) имеет  $K = 1$ .

Таблица 8

## Результаты расчета профиля рабочей поверхности коноидов

№ пп	$\varepsilon$	$a$ , мм	$S$ , мм	$D_1$ , мм	$D_2$ , мм	$D_3$ , мм	$D_4$ , мм	$D_5$ , мм
1	0,35	1,0	11,50	30,97	31,89	32,68	33,36	33,94
2	0,22	1,2	11,45	30,55	31,11	31,63	32,10	32,54
3	0,10	1,4	11,40	30,26	30,53	30,78	31,02	31,26
	$D_5$ , мм	$D_{\max}$ мм	$D_1'$ , мм	$D_2'$ , мм	$D_3'$ , мм	$D_4'$ , мм	$D_5'$ , мм	$D_{\max}$ мм
1	33,94	34,44	32,29	33,43	34,47	35,43	36,35	37,24
2	32,54	32,94	31,78	32,45	33,09	33,69	34,26	34,82
3	31,26	31,48	31,49	31,80	32,10	32,39	32,68	32,96

При скорости деформации  $\dot{\varepsilon} = 0,02 \text{ с}^{-1}$  и шаге винта пластометра  $S_b = 10 \text{ мм}$  выбирается частота вращения шпинделя токарного станка  $N = 9 \text{ об/мин}$ ; при  $\dot{\varepsilon} = 0,05 \text{ с}^{-1}$  –  $N = 18 \text{ об/мин}$ ; при  $\dot{\varepsilon} = 0,1 \text{ с}^{-1}$  –  $N = 45 \text{ об/мин}$ .

При изготовлении коноидов по восьмому качеству точности отклонение скорости деформации от номинального значения не превышает 15 %. Учет упругой деформации элементов конструкции пластометра позволил получать предписанную степень деформации с точностью  $\pm 10 \%$ .

Реализованная и показанная на рис. 34, а конструкция пластометра характеризуется коэффициентом жесткости  $K = 115 \text{ кН/мм}$ .

В процессе испытания производится непрерывный замер силы осадки и температуры поверхности образца. Последняя измеряется термопарой, выведенной через отверстия в асбестовом кожухе и прижатой спаем к боковой поверхности осаживаемого цилиндра.

Мессдоза – полый цилиндр с наклеенными на наружной боковой поверхности тензодатчиками, собранными в безусилительную мостовую схему. Выводы измерительной диагонали тензометрического моста и термопары связаны «витой парой» с аналоговыми входами многофункциональной карты PCI-1800(P/L) для персонального компьютера с частотой преобразования сигналов 330 кГц. Тензометрический мост обеспечен постоянным батарейным питанием.

Аналого-цифровой преобразователь работает с разрешением 16 бит; его производительность зависит от коэффициента усиления (табл. 9).

Таблица 9

Производительность аналого-цифрового преобразователя платы  
PCI-1800(H/L)

Коэффициент усиления	Двухполюсный сигнал, В	Однополюсный сигнал, В	Производительность, кГц
0.5, 1	$\pm 10, \pm 5$	0~10	40
5, 10	$\pm 1, \pm 0.5$	0~1	40
50, 100	$\pm 0.05, \pm 0.1$	0~0.1	10
500, 1000	$\pm 0.01, \pm 0.005$	0~0.01	1

Программное обеспечение PLAST\* системы сбора и обработки информации реализовано на языке программирования Delphi 3. Программа PLAST в качестве интерфейса располагает основным окном, окном настройки программы, окном настройки карты и окном отображения результатов испытаний, из которого таблицы данных передаются в пакет EXCEL, где и проводится статистическая и аналитическая обработка результатов испытания с построением кривых упрочнения  $\sigma_s = \sigma_s(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, t_0)$ .

Всё управление работой программы осуществляется в основном окне, показанном на рис. 39. Кнопки «1» – «4» соответствуют четырем последовательно выполняемым этапам:

- «1» – настройка работы программы;
- «2» – настройка карты;
- «3» – получение значений состояния входных сигналов;
- «4» – сохранение полученных результатов.

После соответствующего заполнения полей основного окна каждое обращение к активным каналам будет производиться через время

$$pause = \frac{TotalTime}{MaxPoint - 1}, \quad \text{или} \quad \Delta t = \frac{T_{\Sigma}}{N - 1},$$

где  $TotalTime (T_{\Sigma})$  – общее время сбора данных с активных каналов;  
 $MaxPoint(N)$  – число запросов состояния входных сигналов.

Поле «число точек за 1 запрос состояния источника сигнала» дает информацию о количестве значений состояния входного сигнала за одно обращение к источнику сигнала. Формирующаяся при этом выборка данных подвергается статистической обработке стандартными

\* Программа разработана и отлажена аспирантом кафедры ОМД УГТУ-УПИ Исхаковым Р.Ф. при консультационной поддержке доцента кафедры Паршакова С.И.



средствами EXCEL. В частности, определяется среднее значение на каждом  $i$ -м обращении к активному каналу. Средние выравниваются по квантилям Фишера и с помощью практически линейной тарировочной функции пересчитываются в значения силы осадки  $P_i$  на  $i$ -м обращении к мессдозе. При использовании эффективных смазок деформация при осадке близка к однородной и диаметр образца  $d_i$  на  $i$ -м шаге замера усилия определяется выражением

$$d_i = d_0 \sqrt{\frac{h_0}{h_i}}.$$

В качестве текущего значения сопротивления деформации на  $i$ -м шаге принимается  $\sigma_{Si} = \frac{4 \cdot P_i}{\pi \cdot d_i^2}$

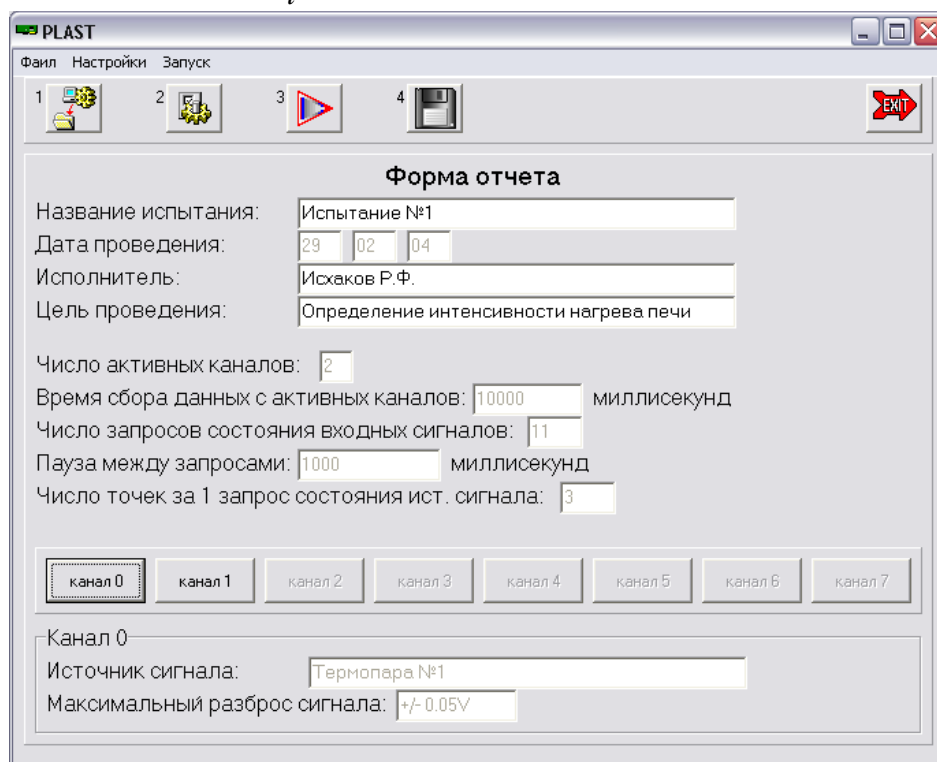


Рис. 39. Основное окно программы PLAST

Относительную деформацию  $\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0} = \frac{h_0 - h}{h_0} = 1 - \frac{h}{h_0}$  на каждом  $i$ -м шаге определяют, допуская постоянство  $V_0$  (реальное снижение скорости движения коноида соответствует механической характеристике асинхронного привода станка и не превышает 1,5 %).

Разработанная программа PLAST работает в режиме реального времени, поэтому временная координата  $i$ -го шага  $t_i = \Delta t \cdot i$ . В пластометрических испытаниях принимается  $i=1$  при первом считывании

сигнала мессдозы, в 5 раз превышающего амплитуду дрейфа нуля, что при назначении уровня сигнала  $\pm 0,05$  В (при настройке карты) не превышает величину  $\varepsilon = 0,01$ .

Используя оговоренный выше выбор (рис. 38) системы координат  $(x, y)$ , можно записать

$$t_i = \int_0^{\Delta h_i} \frac{dy}{\dot{\varepsilon}(h_0 - y)} = -\frac{1}{\dot{\varepsilon}} \ln(h_0 - y) \Big|_0^{\Delta h_i} = \frac{1}{\dot{\varepsilon}} \ln \frac{h_0}{h_0 - \Delta h_i} = \frac{1}{\dot{\varepsilon}} \ln \frac{1}{1 - \varepsilon_i}.$$

Отсюда  $\varepsilon_i = 1 - \exp(-\dot{\varepsilon} \cdot \Delta t \cdot i)$ .

При построении кривых упрочнения удобнее использовать (благодаря аддитивности) логарифмическое представление относительной деформации при осадке

$$\varepsilon'_i = \ln \frac{h_0}{h_i},$$

где  $h_i$  – высота образца на  $i$ -м шаге.

Легко установить связь между  $\varepsilon'_i$  и  $\varepsilon_i$ :  $\varepsilon'_i = \ln \frac{1}{1 - \varepsilon_i}$ . Отсюда

$$\varepsilon'_i = \dot{\varepsilon} \cdot \Delta t \cdot i.$$

Изготовленный, запущенный в эксплуатацию и внедренный в учебный процесс описанный здесь пластометр с автоматизированной системой сбора и обработки информации эффективен и при проведении научных исследований, благодаря производительности и надежной стабилизации скорости деформации при осадке. Он пригоден также для проведения многоцикловых нагружений с регламентированной паузой за счет возможности установки на вал последовательно нескольких коноидов, что позволяет изучать процессы динамического разупрочнения после горячей деформации. Правда, в этом случае, особенно при длительных паузах, необходимо учитывать неминуемое (возможно, существенное) изменение температуры образца, между циклами деформации, если не установить в зоне обжатия муфельную печь.

#### **4.4. Пластометры для динамических и высокоскоростных испытаний**

Конструкции и принципы действия установок для динамических и высокоскоростных пластометрических испытаний отличаются

большим разнообразием, чем у кулачковых и торсионных пластометров.

Достаточно подробный обзор конструкций пластометров, обеспечивающих высокие скорости нагружения и деформации, представлен в работах [12, 26]. Эти машины и устройства иногда классифицируют по видам нагружения: для испытаний на сжатие, на растяжение, на кручение и т.д., но чаще по типу привода основного исполнительного органа. Для скоростных испытаний можно использовать установки безударного и ударного действия с механическим, пневматическим, гидравлическим и пневмогидравлическим приводами. При безударных испытаниях предельно допустимые (возможные) скорости определяются возможностью создания механизмов необходимой мощности. Легко понять, что для высоких скоростей деформирования требуется большая мощность исполнительных механизмов. В гидро- и пневмоприводах при большой скорости течения жидкости или газа ограничением могут служить сопутствующие явления, свойственные этим системам – кавитация, гидроудары и т.д. В установках ударного действия используется запас кинетической энергии, и мощность приводов влияет лишь на производительность, что не является принципиальным при организации пластометрических исследований.

Пластометры ударного действия по способу аккумуляции кинетической энергии, часть которой затем используется на совершение работы деформации образцов, можно классифицировать следующим образом [26]:

- 1) копры со свободным падением груза:
  - маятниковые копры, использующие энергию поднятого маятника;
  - вертикальные копры, использующие энергию свободного падения груза;
- 2) ротационные копры, использующие энергию вращающихся масс;
- 3) копры с ускорителями, использующие упругую энергию пружин, резины и т.п.;
- 4) копры пневматические, использующие энергию сжатого газа;
- 5) копры с использованием энергии взрывчатых веществ (баллистические пластометры);
- 6) электродинамические копры, используют энергию электромагнитных полей.

Примерами машин безударного действия могут служить следующие.

При испытаниях на растяжение с высокой скоростью используются машины, принципиально не отличающиеся от статических испытательных машин. В механизме нагружения машины, показанной на рис. 40, активный захват получает движение от ходовой винтовой пары. Единственным отличием является наличие коробки скоростей или мультипликатора, обеспечивающих большую скорость перемещения активного захвата и большой диапазон регулирования скоростей.

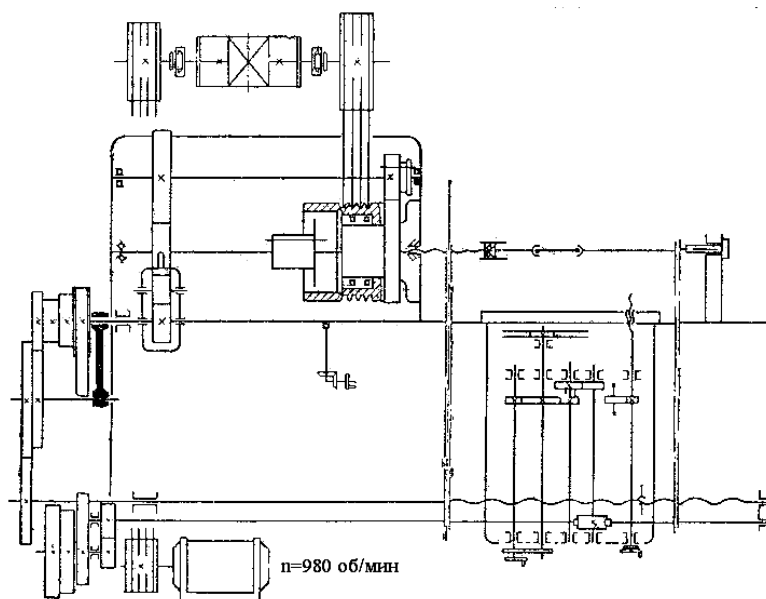


Рис. 40. Кинематическая схема механизма нагружения машины для испытания на растяжение при различных скоростях деформации

В машине, изображенной на рис. 40, используется многозаходный винт с большим шагом. Бесступенчатый вариатор и набор сменных шестерен обеспечивают изменение скорости испытаний в широком диапазоне. Получение заданной скорости деформирования в начале растяжения образца достигается предварительным разгоном массивных шкивов с последующим включением фрикционной муфты. Холостой пробег активного захвата составляет 150...200 мм, и это исключает влияние времени срабатывания муфты.

С целью эффективного регулирования скорости деформирования широко используются многоредукторные машины с целым набором передаточных отношений. Примером перенастраиваемой по передаточному числу может рассматриваться машина, схема которой показана на рис. 41. В этой машине с усилием до 10 кН растяжение образца производится с помощью червячного редуктора и копира, связанного с активным захватом. Изменение скорости деформирования

ния осуществляется за счет изменения передаточного числа червячного редуктора и смены копира.

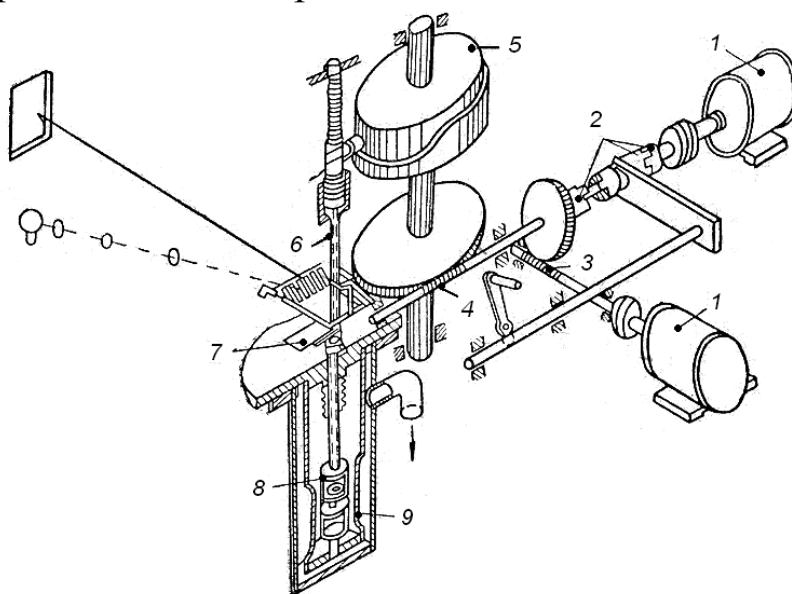


Рис. 41. Кинематическая схема машины для испытания на растяжение и сжатие при различных скоростях и температурах: 1 – электродвигатели; 2 – муфта включения; 3, 4 – червячные передачи; 5 – копир; 6 – упругий элемент; 7 – фотоэлектрическое устройство для замера и записи усилий и деформаций; 8 – захваты; 9 – кожух

Известно применение в скоростных испытательных машинах цепных механизмов, пример одного из которых показан на рис. 42. В заданный момент активный захват соединяется с подвижной кареткой, установленной на цепи, и происходит обрыв образца. Скорость деформирования изменяется коробкой скоростей, а усилие замеряется мессдозой, на которой закреплен неподвижный захват. Такая цепная испытательная машина может быть создана на базе серийного цепного волочильного стана. На цепных испытательных машинах удастся достичь средней скорости деформации во время испытания  $35 \text{ с}^{-1}$ .

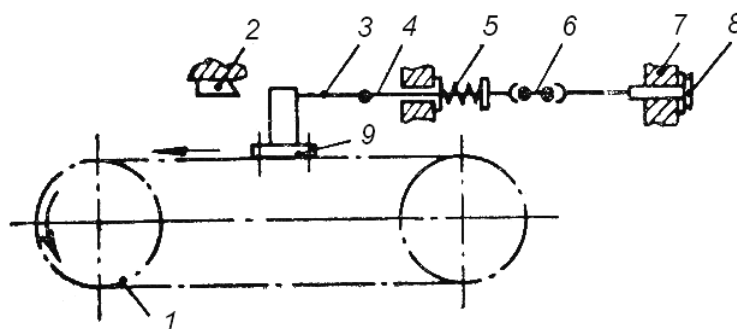


Рис. 42. Схема цепного механизма нагружения:  
1 – нагружающая цепь; 2 – клин; 3 – тяга; 4 – шарнир; 5 – пружина; 6 – образец; 7 – стойка; 8 – упругий элемент; 9 – каретка

Известна практика использования приводов металлорежущего оборудования, в частности строгальных станков, для проведения скоростных испытаний на растяжение образцов [26].

Гидравлические приводы скоростных испытательных машин, например показанной на рис. 43, позволяют проводить высокотемпературные испытания на растяжение при скорости движения активных захватов от 0,3 до 180 мм/с. Модернизированные машины такого типа позволяют достигать скорости деформирования при растяжении до 630 мм/с. В гидравлических испытательных машинах динамического нагружения применяются гидравлические вариаторы, с помощью которых удастся поднять скорость до 1 м/с и использовать машину для пластометрических исследований при растяжении в диапазоне скоростей деформации от  $0,0002$  до  $20 \text{ с}^{-1}$ .

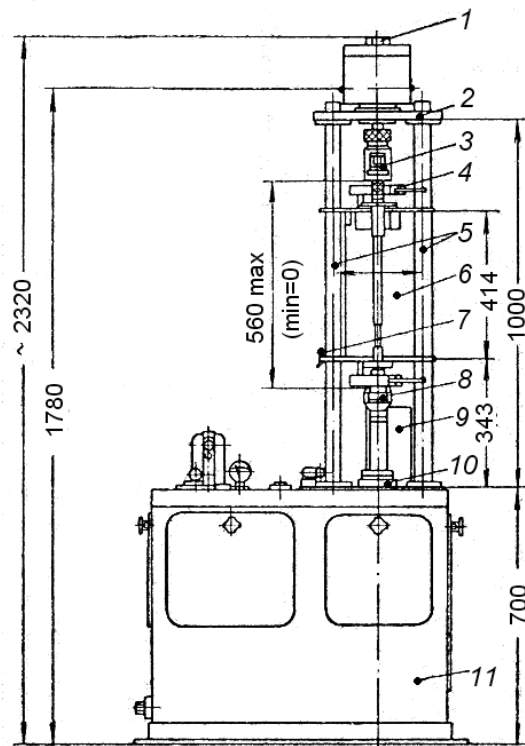


Рис. 43. Машина с гидравлическим приводом для испытания на растяжение при высоких температурах и различных скоростях деформирования:

- 1 – силоизмеритель; 2 – траверса; 3 – верхний захват; 4 – экран; 5 – стойки;  
6 – нагревательное устройство; 7 – стопор; 8 – активный захват; 9 – датчик деформации; 10 – рабочий цилиндр; 11 – станина

Машина с пневмогидравлическим приводом, изображенная на рис. 44, позволяет программно задавать закон изменения скорости нагружения во времени. После закрепления образца 6 в захватах 5 и 7 шток 4 привода и копир 9 лебедкой 1 перемещается влево и удерживается в крайнем положении упором 8. При перемещении штока 4

жидкость из цилиндра 15 через клапан 12 перетекает в полость цилиндра 14, сжимая находящийся там азот. Скорость нагружения образца обеспечивается за счет быстрого срабатывания электромагнита спускового

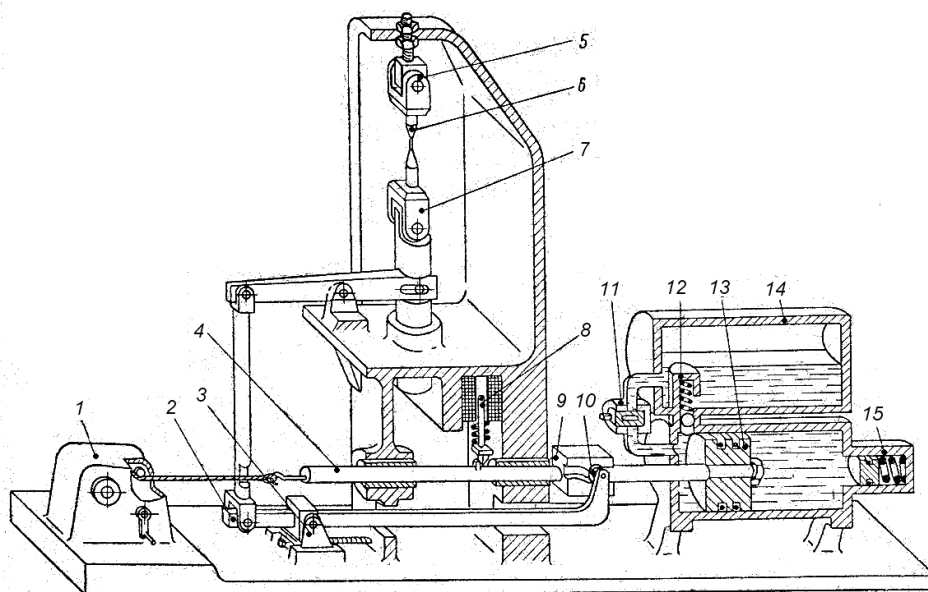


Рис. 44. Схема испытательной машины с пневмогидравлическим приводом

механизма, освобождающего шток от упора 8. Жидкость из цилиндра 14 под давлением сжатого азота передается в цилиндр 11 и давит на поршень 13, перемещая шток 4 и копир 9 вправо, воздействуя тем самым на ролик 10 рычага 2, давление которого передается через систему рычагов на активный захват 7, перемещая его в вертикальном направлении по заданной программе, предписанной копиром (сменным). Скорость перемещения штока 4 регулируется дросселем между цилиндрами 15 и 14, а также начальным давлением азота. Нагрузка при малых пластических деформациях и рабочий ход активного захвата регулируются выбором положения каретки 3, которая перемещается вдоль рычага 2. Рабочее усилие показанной на рис. 44 машины составляет 10 кН, а длительность деформирования варьируется от 0,1 до 0,005 с.

В скоростной пневматической испытательной машине Института машиноведения РАН (рис. 45) достигаются более высокие скорости деформирования, чем на пневмогидравлических испытательных машинах. Образец 1 устанавливается между удлинительными штангами 2 и 3. Верхняя из них 2 связана посредством шаровой опоры 4 и штока 5 с поршнем 6, перемещающимся при подаче сжатого азота в камеры 7 или 9 цилиндра 8. Скоростное деформирование (растяже-

ние) обеспечивается быстрым срабатыванием пневмоклапана *11*, открывающего доступ сжатому азоту из баллона *12* в камеру *7* или *9*.

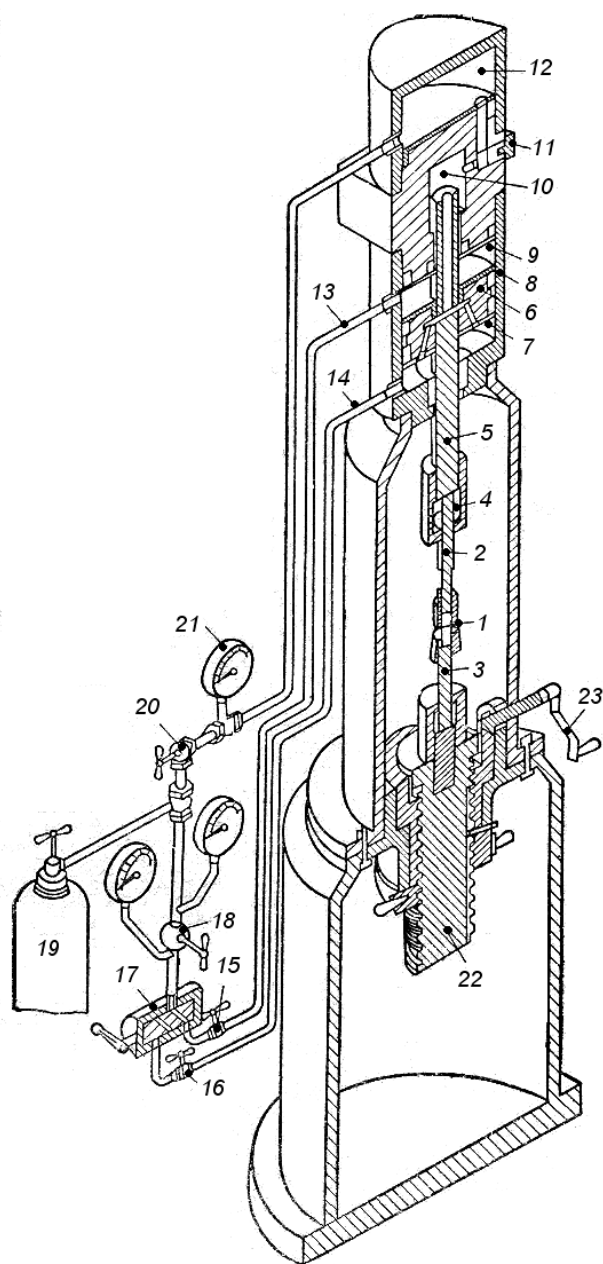


Рис. 45. Схема нагружающего устройства с пневматическим приводом при скоростном растяжении

Скорость нагружения может регулироваться в широких пределах с помощью вентиля, соединяющего клапан *11* с камерой *10*. Американские машины подобного типа фирмы ASTM в настоящее время позволяют проводить испытания со скоростью 5...40 м/с.

При скоростных испытаниях на сжатие преимущественно применяют кулачковые пластометры. Пригодны также и все типы машин, используемых для скоростных испытаний на растяжение.



Машины для скоростных испытаний на кручение конструктивно мало отличаются от описанных торсионных пластометров. Одна из таких машин показана на рис. 46.

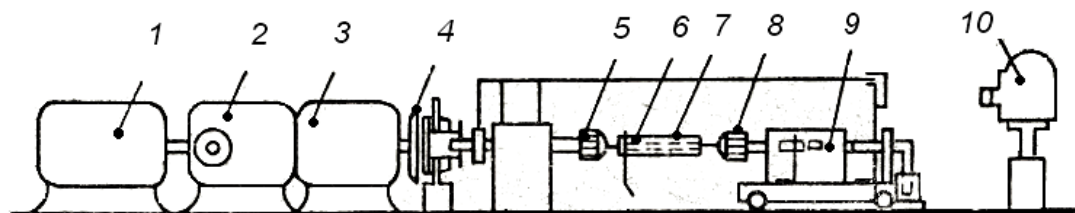


Рис. 46. Схема испытательной машины для скоростных испытаний на кручение

Крутящий момент от электропривода 1 через гидравлический вариатор 2, редуктор 3 и электромагнитную муфту 4 передается на активный захват и образец 6, помещенный в трубку из нержавеющей стали 7 и закрепленный в зажимах 5 и 8. На схеме условно показаны измерительное устройство 9 и регистрирующий прибор 10. Вариатор позволяет бесступенчато регулировать частоту вращения от 0,1 до 1000 об/мин. Деформация кручения начинается при включении электромагнитной муфты после разгона двигателя и вариатора. В выключенном состоянии муфта играет роль тормоза, срабатывающего за 0,1 с. Образец нагревается в печи сопротивления в защитной атмосфере (аргон). На машине можно испытывать материалы со скоростью деформации  $0,03 \dots 30 \text{ с}^{-1}$ .

Пластометр для испытаний на кручение со скоростью до  $250 \text{ с}^{-1}$  изготовлен в Днепропетровском металлургическом институте на базе токарно-револьверного станка. В линии шпиндель—образец—мессдоза монтируется кулачковая муфта, которая обеспечивает получение постоянной скорости испытания после предварительного разгона двигателя и шпинделя.

Практически все пластометрические установки ударного действия называются копрами с указанием способа запасания кинетической энергии. Маятниковые пластометры (копры) конструктивно подобны машинам для испытания на ударную вязкость. На рис. 47 схема такого копра иллюстрирует принцип его действия [12].

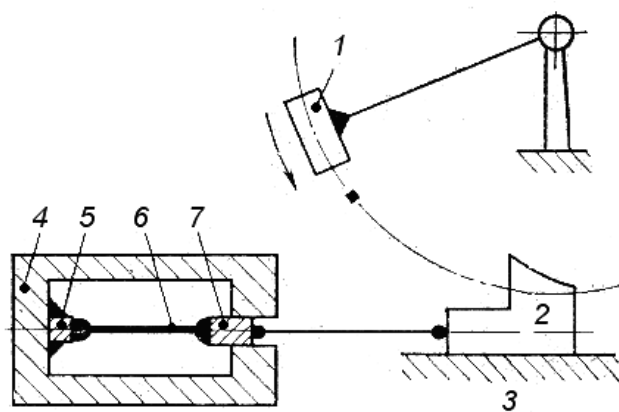


Рис. 47. Схема испытаний на растяжение на маятниковом пластометре:

1 – маятник; 2 – подвижный ползун; 3 – направляющая ползуна;  
4 – нагревательное устройство; 5 – неподвижный захват; 6 – образец;  
7 – подвижный захват

Достигаемые скорости деформации сравнительно невелики (при растяжении до  $1...2 \text{ с}^{-1}$ ). Маятник с закрепленным на конце грузом поднимается в верхнее положение и там фиксируется. При падении его потенциальная энергия переходит в кинетическую, а часть последней совершает работу деформации образца. Естественно, скорость деформации при таком испытании не остается постоянной, и в пластометрических испытаниях в рассмотрение принимают среднюю скорость деформации. Маятниковые копры в равной степени могут быть пригодны для испытаний как на сжатие, так и на растяжение. В последнем случае применяются специальные захваты, не требующие существенной реконструкции копра. Пример конструктивного исполнения такого захвата приведен на рис. 48 [26].

Образец 2 одной головкой крепится посредством втулки-динамометра 4 к маятнику 5. На другом конце образца крепится поперечина 1 (рис. 48, а), или образец вворачивается в поперечину 1 и призматическую гайку 4, входящую в паз в виде ласточкина хвоста в теле маятника (рис. 48, б). В обоих случаях растяжение и обрыв образца осуществляются при ударе поперечины 1 об опору 3.

Всем маятниковым пластометрам присущи следующие недостатки:

- сложность установки нагревательных устройств;
- малая скорость деформирования и переменная скорость деформации;
- невозможность строго осевого приложения нагрузки в течение всего цикла деформации.

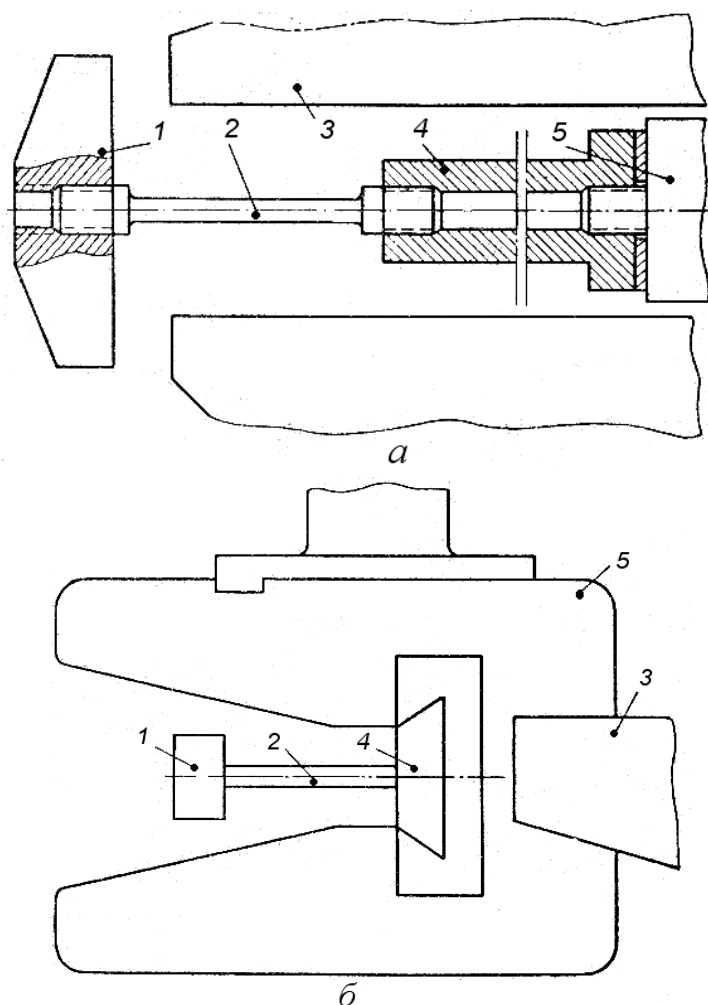


Рис. 48. Схема крепления образца в маятнике копра для испытания на растяжение

Широкое распространение при динамических испытаниях получили вертикальные копры, как наиболее конструктивно простые устройства. При испытаниях на копрах при падении бабы скорость деформации не остается постоянной. Известная энергия свободно падающей на образец бабы позволяет сравнительно точно определить сопротивление деформации. Если падающая с высоты  $H$  на образец баба отскакивает от него на высоту  $H_1$ , то сопротивление деформации определяется по формуле Финка [12]:

$$\sigma_s = \frac{W}{V \ln \frac{h_0}{h_1}},$$

где  $W$  – работа удара;  $W = mg(H - H_1)$ ;

$m$  – масса бабы;

$g$  – ускорение свободного падения;

$V$  – объем деформируемого тела с высоты  $h_0$  до  $h_1$ .

Сопротивление деформации определяется как среднее в интервале высот осаживаемого образца  $h_0$  и  $h_1$ . Вертикальные копры просты по конструкции и при определении средней величины сопротивления деформации не требуют измерительной и регистрирующей аппаратуры.

Любой вертикальный копёр можно использовать при испытаниях на сжатие и на растяжение. В последнем случае может быть использовано приспособление, показанное на рис. 49 [26].

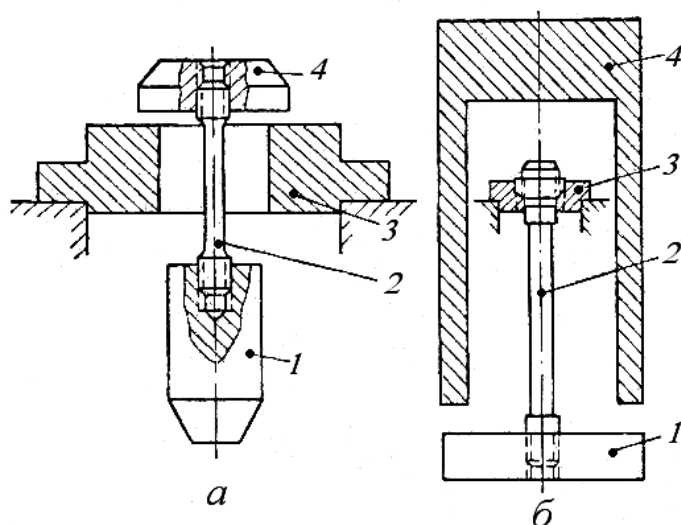


Рис. 49. Схемы растяжения образца при испытании на вертикальном копре

По первой схеме (рис. 49, *а*) образец 2 соединяется с бабой 1 и контрбабой 4. При ударе контрбабы об ограничитель 3 из-за инерционного воздействия бабы на образец происходит растяжение и разрыв образца. По второй схеме (рис. 49, *б*) разрыв образца 2 падающей бабой 4 происходит при ударе ее о плиту 1, соединенную с нижней головкой образца, неподвижно закрепленного в поперечине 3. Применение первой схемы затрудняет использование устройств нагрева образцов. На рис. 50 показан копёр для испытаний на растяжение образцов при высоких температурах.

Данная копровая пластометрическая установка оснащена устройством электроконтактного нагрева, фотоэлектрическим датчиком деформации, тензометрическим силоизмерителем и устройством для охлаждения образца после испытания (после разрыва). При испытаниях на сжатие образец устанавливается на нижний неподвижный боек (в котором смонтирована мессдоза), помещенный в направляющий стакан на резиновой прокладке для уменьшения вибрации при ударе. Верхний боек крепится к бабе копра.

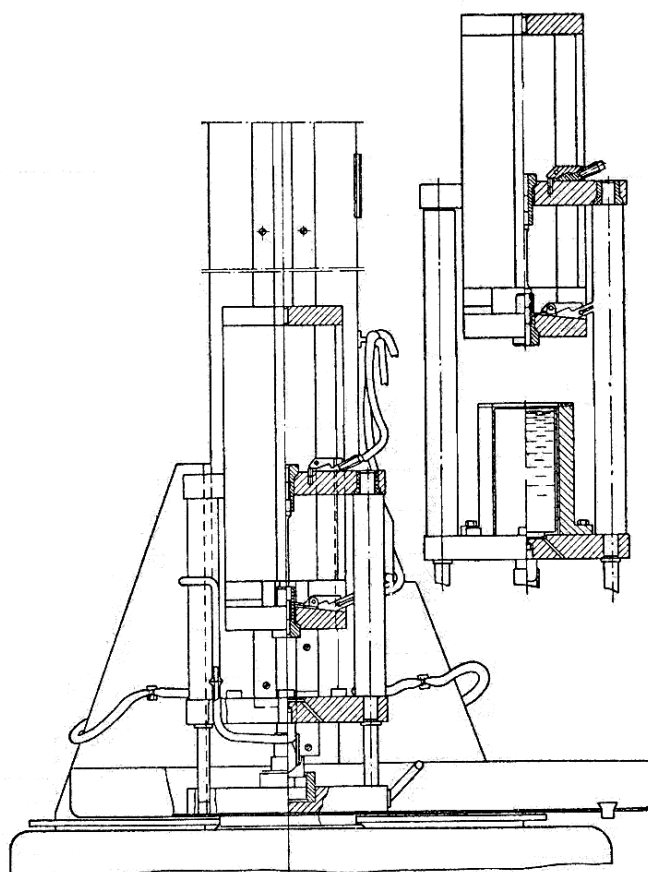


Рис. 50. Нагружающее устройство для испытания на растяжение при высоких температурах на вертикальном копре

Поскольку получить постоянную скорость деформации на копре невозможно, используют бабы максимально возможного веса, когда потребная для деформации энергия составляет лишь долю приобретенной бабой при падении кинетической энергии. В этом случае можно обеспечить скорость деформации, близкую к постоянной.

В ротационных копрах для деформации образцов используется кинетическая энергия маховика. Применяются три конструктивных схемы этих пластометров. Копер, изготовленный по первой схеме (рис. 51, *a*), имеет вращающийся маховик 4, из которого специальным устройством 3 выбрасываются два бивня 9, выполняющие удар по наковальне 10, жестко связанной с одним концом образца 7 или с удлинителем образца, установленным, в свою очередь, в нагревательном устройстве 8. Верхняя головка образца закреплена на динамометрическом стержне 6, закрепленном на траверсе 5 машины. На ротационных копрах такого типа удастся проводить испытания со скоростью деформации  $130 \dots 900 \text{ с}^{-1}$ .

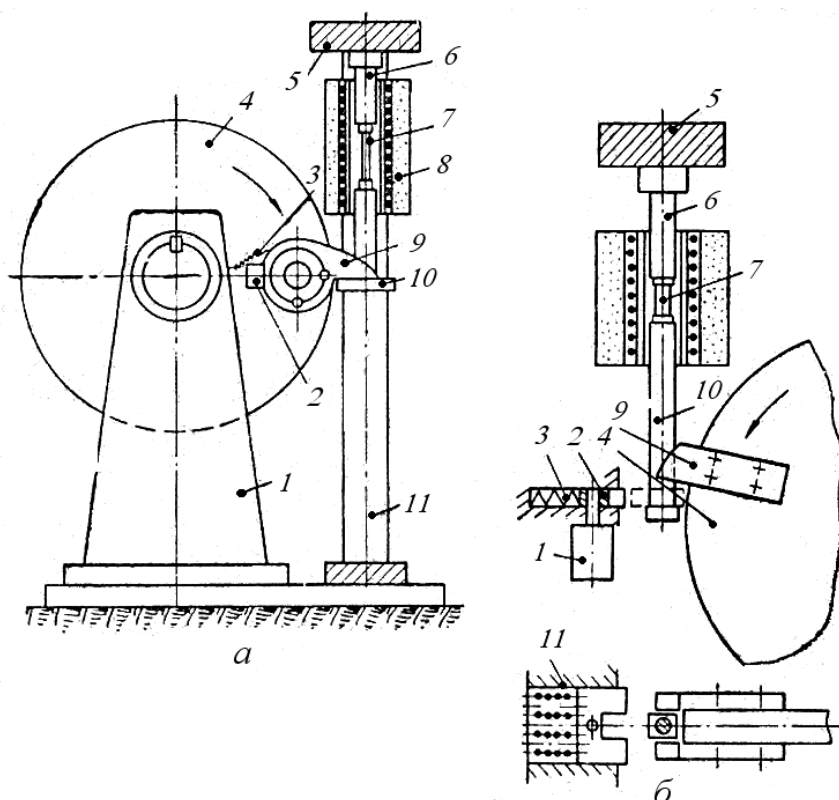


Рис. 51. Схема ротационного копра

Ротационный копёр второго типа (рис.51, б) отличается применением жестко закрепленных на маховике спаренных бивней 9 и механизмов, обеспечивающих в момент удара контакт бивней 9 и удлинителя образца 10. При вращении маховика с предписанной скоростью специальное устройство 1 при подаче на него напряжения освобождает установленную в направляющих 11 скобу 2. Пружина 3 перемещает скобу к головке образца, чтобы в вырез попала рабочая часть. Максимальная окружная скорость маховика таких установок составляет 80...125 м/с.

Ротационный копёр-пластометр третьего типа, показанный на рис. 52, передает усилие на образец, закрепленный в захвате 7 и помещенный в печь 6, через эластичную тягу 4. Верхний захват соединен с динамометрическим устройством 8. Особенностью этого пластометра является обеспечение линейного ускорения в отличие от первых двух схем, в которых наковальне не сообщается окружное ускорение. В этой установке скорость деформирования составляет от 0,002 до 20 м/с. В литературе имеются указания и на более высокие скорости.

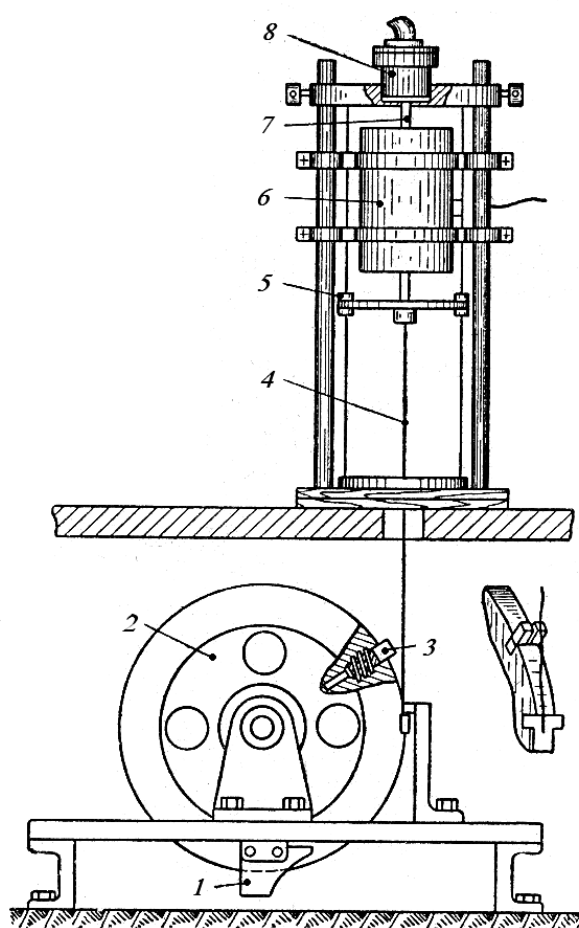


Рис. 52. Схема ротационного копра с передачей усилия через эластичную тягу

На практике применяют также динамические испытания на кручение на машинах подобного типа. Образец одним концом закрепляется в планшайбе, другим — в захвате, связанном с маховиком. Маховик и захват с ударными бивнями вращаются от электропривода. При заданном числе оборотов маховик отключается от двигателя фрикционной муфтой, и при помощи рычажной системы освобождаются бивни, которые сцепляются с планшайбой и разрушают или скручивают на определенный угол образец.

Для получения при испытаниях высоких скоростей деформации используются копры с упругими ускорителями — пружинными (рис. 53) или резиновыми (рис. 54) [26].

В копре с пружинным ускорителем (рис. 53) образец 3 с резьбовыми головками присоединяется одним концом к мессдозе 4, а другим концом к удлинителю 2, закрепленному в подвижной поперечине 1, которая перемещается посредством тяг 7 в направляющих 8 по стержням 9. Деформация растяжения и разрыв образца осуществляются за счет энергии предварительно сжатой пружины 6. При испытаниях удастся достичь скорости деформирования 15 м/с.

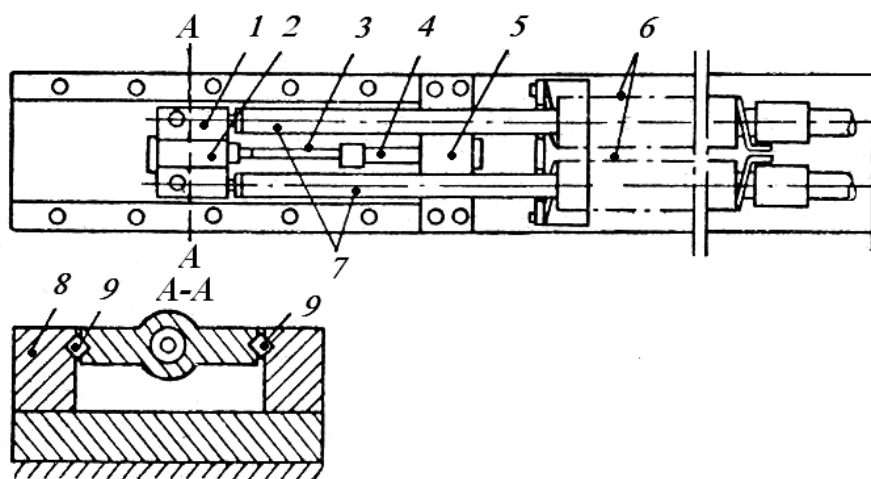


Рис. 53. Схема копра с пружинным ускорителем

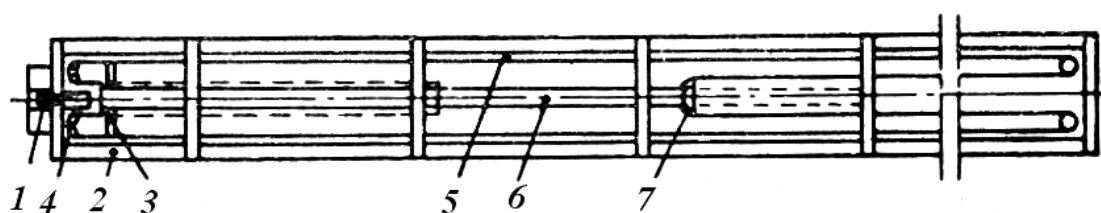


Рис. 54. Схема копра с резиновым ускорителем

Копры с резиновыми ускорителями (рис. 54), обеспечивающие скорости удара 5...100 м/с, имеют следующие преимущества по сравнению с пневматическими и ротационными копрами:

- простота изготовления;
- плавность изменения скорости в широком диапазоне за счет изменения хода бойка и силы натяжения резиновых шнуров;
- возможность осуществления различных схем нагружения.

Изображенный на рис. 54 копьёр содержит резиновый ускоритель, состоящий из двух склеенных в замкнутые кольца резиновых шнуров длиной 9 м. Кольца 5 растянуты при помощи роликов на раме 2. Слева кольцо охватывает боек со стальным ударником 1, а справа с помощью специальной рамки 7 оно соединяется с кольцом 6, изготовленным из полосовой резины. Другой конец этого кольца закреплен на раме осью 3. Боек 4, скользящий вдоль направляющих из составных стержней, оттягивается тросом из левого положения в правое; одновременно рамка 7 оттягивается другим тросом. Наибольший путь, проходимый бойком, составляет 5,5 м, наибольшая скорость – 100 м/с.

По принципу передачи накопленной энергии образцу устройства со взрывными ускорителями подразделяют на два типа:

- 1) с непосредственным нагружением образца;



2) с передачей накопленной энергии образцу ударом бойка (снаряда), движущегося с предварительно заданным ускорением.

В камеру сгорания 1 (рис. 55, а) вводят химически активное вещество или взрывчатую газовую смесь. Газ воздействует на поршень 2, связанный с головкой образца 1. Другой конец образца крепится к корпусу 3 через гайку 4 и прижим 5. Под давлением газа поршень 2 перемещается в отверстии корпуса 3. Полости II-IV служат для подачи газовой смеси и воспламеняющего устройства.

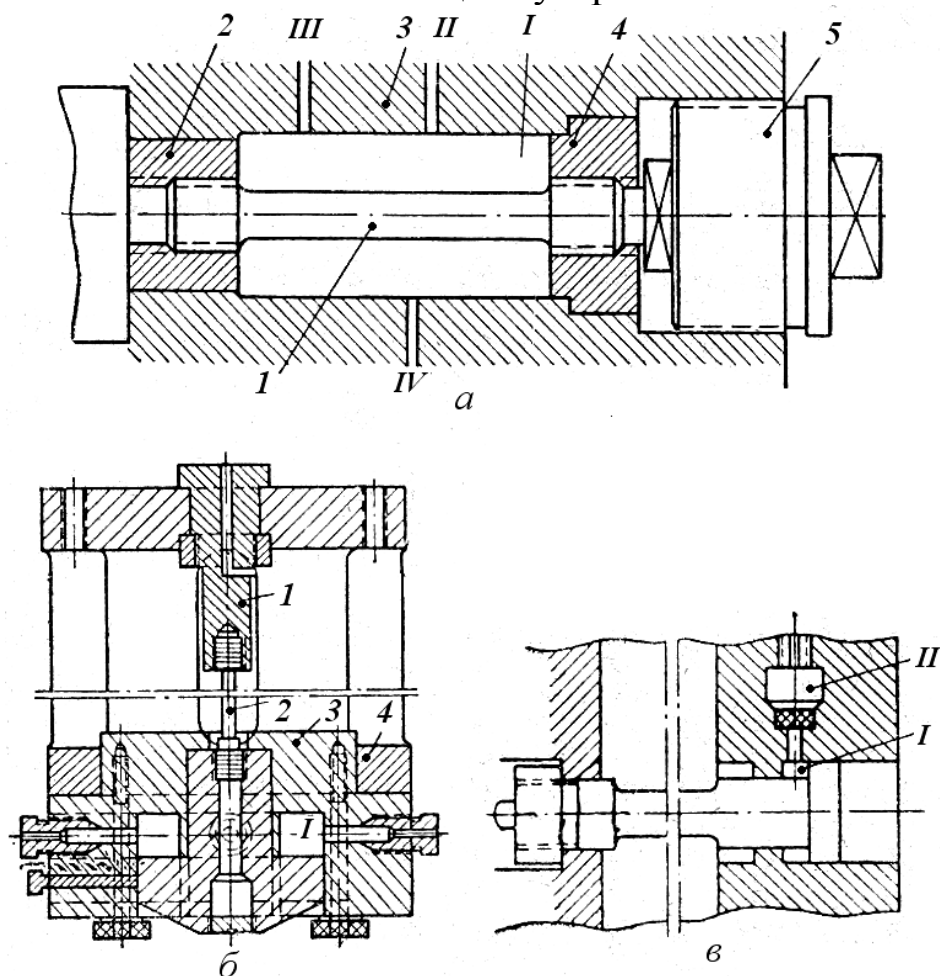


Рис. 55. Схемы устройств для высокоскоростных испытаний с применением в качестве энергоносителя взрывчатых смесей и взрывчатых веществ

В этой схеме взрыв химически и термически воздействует на образец, что может искажать результаты испытания.

Вторую схему (рис. 55, б) следует считать более совершенной. Здесь образец 2 помещен за пределами камеры сгорания. Рабочий цилиндр 3 закрепляется в массивном корпусе 4. Используется электроконтактный нагрев, а контакты закрепляются на удлинителях образца 2. Зажим контакта представляет собой коническую втулку. В начальный период деформации шток удлинителя выходит из контакта с конической втулкой. Предусматривается возможность охлаждения в

воде образца после испытаний для фиксирования структуры металла. В подобных устройствах достигается скорость деформирования 5...30 м/с.

Достижение более высоких скоростей возможно при обеспечении быстрого нарастания давления, как это реализуется в установке третьего типа, показанной на рис. 55, в. Камера сгорания II рабочего цилиндра отделяется перегородкой от камеры I. Для изготовления обычно используются неметаллические хрупкие материалы.

Увеличения скорости деформирования добиваются за счет использования дополнительных зарядов.

Скорости деформирования до 1000 м/с можно получать в устройствах с передачей накопленной энергии образцу при ударе движущейся массы поршня. В установке, показанной на рис. 56, применением трубчатых образцов удастся значительно уменьшить массу деталей. Нагружающий механизм состоит из пулемёта 5 калибра 12,7 мм, закрепленного соосно с образцом в центрирующих устройствах 3 и 4, прикрепленных к стойкам 2. Трубчатый образец 9 закрепляется в силоизмерителе 8 и пулеприемнике 10. Силоизмеритель верхней частью опирается на конические втулки 7 и плотно прижимается с помощью гайки 6 к опорной плите 1. Пуля из пулемета пролетает через отверстие в прижимной гайке 6 и через канал образца 9 ударяет в утолщенную донную часть пулеприемника 10 и тем самым производит ударный разрыв образца.

Еще одной разновидностью высокоскоростных копров, использующих энергию взрыва, является телескопический копёр (рис. 57), состоящий из гладкого ствола, укрепленного на основании. Внутри ствола находится полый шток, верхняя часть которого жестко соединена со стволом. В верхней части ствола находятся патронник и спусковой механизм.

Образец крепится к нижнему торцу штока через силоизмеритель. Деформация и разрушение образца происходят при ударе поршня-снаряда о траверсу, скрепленную с нижней головкой образца. Испытания на этом копре проводятся со скоростью деформирования 15...300 м/с.

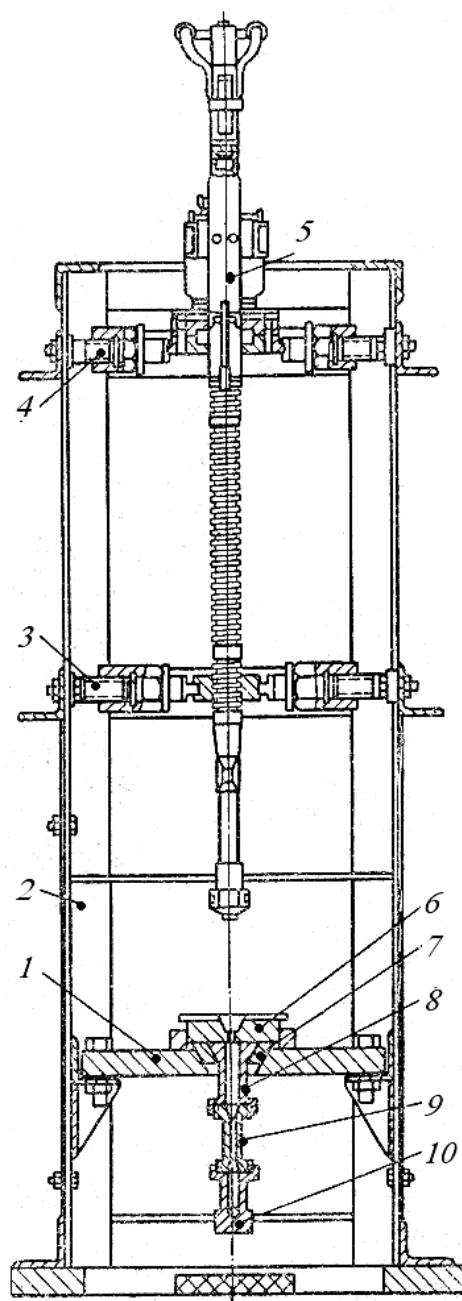


Рис. 56 Схема высокоскоростной установки Г.Н.Козлова

Общими недостатками копров, в которых ускорение достигается за счет энергии взрыва, являются следующие:

- сложность использования нагревательных устройств, которые приходится удалять перед выстрелом; это ведет к охлаждению образцов;
- длительный период подготовки установки к испытаниям;
- сложная конструкция виброизоляции основания копра.

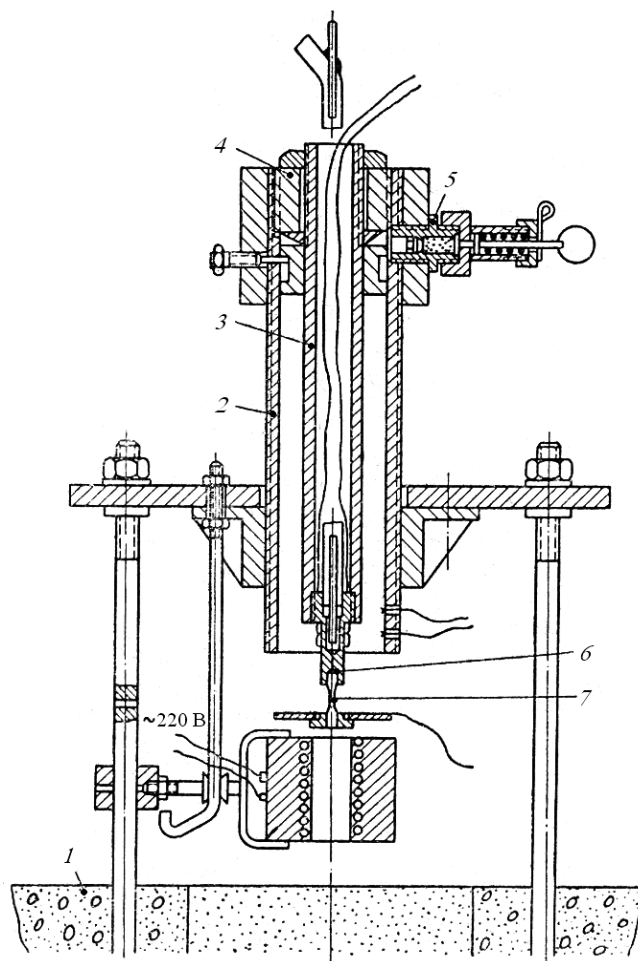


Рис. 57. Телескопический копер:

1 – основание; 2 – ствол; 3 – полый шток; 4 – патронник;  
5 – спусковой механизм; 6 – упругий элемент; 7 – образец

В электродинамических копрах используются импульсные источники энергии. К импульсным методам деформирования, в частности, относится метод электромагнитных полей, где кратковременное воздействие электромагнитного поля образуется при разряде высоковольтного конденсатора. При надевании на соленоид кольцевого тонкостенного образца в нем индуктируются токи, вызывающие образование собственного электромагнитного поля. При взаимодействии импульсных электромагнитных полей происходит динамическое деформирование кольцевого образца. Современные установки запасают энергию до 6...15 кДж и позволяют производить пластометрические исследования со скоростью деформирования 90...300 м/с. В кольце реализуется одноосное напряженное состояние с тангенциальными напряжениями, определяемыми из баланса энергии.

## **5. Алюминий и его сплавы.**

### **Классификация, маркировка, химический состав, сопротивление деформации**

Алюминий кристаллизуется в гранецентрированной кубической решетке с периодом 0,4 нм. Имеет высокие теплоемкость и скрытую теплоту плавления, поэтому для нагрева и плавления требуются большие энергозатраты. Электропроводность чистого алюминия (99,997 %) составляет 65,5 % от электропроводности меди. Все примеси и легирующие снижают электропроводность. Основные физические свойства чистого алюминия приведены в табл. 10.

Алюминий – химически активный металл. Однако окисная пленка на его поверхности защищает от вредного воздействия атмосферы. Если окисная пленка ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) образуется на воздухе при комнатной температуре, то ее толщина составляет 5...10 нм; при нагреве до  $650^\circ\text{C}$  толщина пленки возрастает до 200 нм.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  имеет плотность, близкую к плотности алюминия, что создает трудности с очисткой расплава алюминия от взвешенных пленок  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Окисная пленка имеет хорошее сцепление с металлом, плотна и однородна.

Алюминий химически устойчив против концентрированных азотной ( $\text{HNO}_3$ ) и ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) кислот, но активно взаимодействует с их растворами, особенно при нагреве. Al быстро растворяется в HCl, HF, HBr,  $\text{H}_3\text{PO}_4$  и HCr, а также в растворах едких щелочей. Слабо взаимодействует с органическими кислотами, за исключением щавелевой и муравьиной. Устойчив против окисления в пресной и морской воде, в сернистом газе, аммиаке, сероводороде промышленных выбросов. При  $500^\circ\text{C}$  Al активно взаимодействует с водяными парами:  $2\text{Al} + 3\text{H}_2\text{O} = \text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{H}_2$ . Частично выделяющийся водород поглощается самим алюминием. Алюминий имеет сравнительно малое сечение захвата тепловых нейтронов  $0,215 \cdot 10^{-28} \text{ м}^2$ , что существенно ниже, чем у железа ( $2,43 \cdot 10^{-28} \text{ м}^2$ ), никеля ( $4,5 \cdot 10^{-28} \text{ м}^2$ ) и меди ( $3,59 \cdot 10^{-28} \text{ м}^2$ ).

#### **5.1. Маркировка полуфабрикатов из алюминия и его сплавов**

##### **5.1.1. Система маркировки в России**

Для обозначения алюминиевых деформируемых сплавов и полуфабрикатов используются буквенно-цифровая и цифровая маркировки.

Таблица 10

## Основные физические свойства алюминия [33, 34, 35]

Свойство	Единица изм.	Значение
Атомная масса	—	26,981
Плотность при 20 <sup>0</sup> С	г/см <sup>3</sup>	2,698
Температура плавления	<sup>0</sup> С	660,24
Увеличение объема при плавлении	%	6,5
Температура кипения	<sup>0</sup> С	2520
Скрытая теплота плавления	кДж/кг	389,37
Скрытая теплота испарения	кДж/кг	10885
Удельная теплоемкость при 20 <sup>0</sup> С	Дж/(кг·К)	961,7
Удельная теплопроводность при 20 <sup>0</sup> С	Вт/(м·К)	221,5
при 150 <sup>0</sup> С	То же	240
при 300 <sup>0</sup> С	-«-	230
при 500 <sup>0</sup> С	-«-	220
в жидком состоянии	-«-	93
Коэффициент линейного расширения при 25 <sup>0</sup> С	10 <sup>-6</sup> ·К <sup>-1</sup>	23,3
при 150 <sup>0</sup> С	То же	24,5
при 300 <sup>0</sup> С	-«-	28,1
при 500 <sup>0</sup> С	-«-	32,6
в жидком состоянии	-«-	37,8
Удельное электросопротивление при 20 <sup>0</sup> С	мкОм·м	0,02767
Модуль нормальной упругости при – 150 <sup>0</sup> С	ГПа	78
при 20 <sup>0</sup> С	То же	71
при 100 <sup>0</sup> С	-«-	70
при 200 <sup>0</sup> С	-«-	66
при 300 <sup>0</sup> С	-«-	61
при 400 <sup>0</sup> С	-«-	56
при 500 <sup>0</sup> С	-«-	50
при 600 <sup>0</sup> С	-«-	44
Модуль сдвига	ГПа	25...26,5
Коэффициент Пуассона		0,31

*Буквенно-цифровая маркировка  
(без обозначения – без обработки)*

Мягкий отожженный.....	М
Нагартованный.....	Н
Нагартованный на 3/4 .....	Н3
Нагартованный на 1/2 .....	Н2
Нагартованный на 1/4 .....	Н1
Закаленный и естественно состаренный.....	Т
Закаленный и искусственно состаренный на максимальную прочность.....	Т1

Режимы искусственного старения, обеспечивающие  
перестарение материала  
(режимы смягчающего искусственного старения)..... T2, T3  
Закалка полуфабрикатов с температуры окончания горячей обработки  
давлением и последующее искусственное старение  
на максимальную прочность..... T5  
Закалка, усиленная правка растяжением (1,5...3%)  
и искусственное старение на максимальную прочность..... T7

### *Цифровая маркировка*

Первая цифра в этой маркировке обозначает основу сплава. Алюминий и сплав на его основе маркируют цифрой 1. Вторая цифра обозначает основной легирующий компонент или основные легирующие компоненты. Вторая цифра 0 обозначает различные марки алюминия, спеченные алюминиевые сплавы (САС), различные сорта пеноалюминия. Цифрой 1 обозначают сплавы системы Al-Cu-Mg, цифрой 2 – сплавы системы Al-Cu, цифрой 3 – сплавы системы Al-Mg-Si, цифрой 4 – сплавы системы Al-Li, а также сплавы, легированные малорастворимыми компонентами, например переходными металлами (марганцем, хромом, цирконием); сплавы, замаркированные цифрой 5, базируются на системе Al-Mg и называются магналиями; сплавы систем Al-Zn-Mg или Al-Zn-Mg-Cu обозначаются цифрой 9. Цифры 6, 7 и 8 – резервные.

Последние две цифры в цифровом обозначении – порядковый номер сплава. Последняя цифра несет дополнительную информацию: сплавы, оканчивающиеся на нечетную цифру, – деформируемые; на четную, – литейные.

#### ***5.1.2. Система маркировки в США***

Принята единая цифровая четырехзначная система обозначения деформируемых алюминиевых сплавов, введенная Алюминиевой ассоциацией (АА). Она является наиболее распространенной и используется в качестве международной. В ее основе система легирования алюминиевых сплавов, база – основной легирующий элемент. Первая цифра обозначения указывает на систему легирования, к которой относится сплав:

Алюминий чистотой 99,0 % и выше	–1	Система Al-Mg-Si	–6
Система Al-Cu	–2	Система Al-Zn-Mg и Al-Zn- Mg-Cu	–7
Система Al-Mn	–3	Прочие системы легирования	–8
Система Al-Si	–4		
Система Al-Mg	–5		

Вторая цифра обозначения указывает на порядковый номер модификации сплава относительно исходного сплава (в исходном – вторая цифра 0) или свидетельствует о чистоте сплава по примесям. Две последние цифры обозначают непосредственно сплав.

Число состояний полуфабрикатов из алюминиевых сплавов в США составляет несколько сотен. Система обозначений состояний распространяется на все виды полуфабрикатов из деформируемых алюминиевых сплавов, кроме слитков. Она основана на последовательности основных термических обработок для получения различных состояний. Обозначение состояний следует за обозначением сплава. Основное состояние обозначается буквой, а его разновидности – одной или несколькими цифрами, которые следуют после буквы. При некоторых различиях в характеристиках при той же последовательности основных операций обработки вводятся дополнительные символы.

### *Обозначение основных состояний деформируемых сплавов и полуфабрикатов, принятое в США*

После изготовления.....	F
Отожженное.....	O
Нагартованное *	H
Только нагартованное.....	H1
Нагартованное и частично отожженное.....	H2
Нагартованное и стабилизированное.....	H3

\* За H всегда следуют две или более цифры, первая цифра указывает на конкретную последовательность основных операций обработки.

Цифры, следующие за H1, H2 и H3, указывают на степень нагартованности. Цифра 8 обозначает состояние с пределом прочности, который достигается холодной прокаткой с 75 % обжатием (температура прокатки не превышает 50<sup>0</sup>C) после полного отжига. Состояние материала между 0 (отожженное) и 8 обозначается цифрами от 1 до 7. Цифрой 9 маркируется состояние материала, когда предел прочности



выше Н8 минимум на 13 МПа. Для Н-состояния с двузначным обозначением (где вторая цифра является дополнительной) стандартные значения предела прочности сплава находятся точно посередине между значениями двух соседних Н-состояний.

Третий знак (цифра) указывает на некоторое отличие от состояния с двузначным обозначением:

Закалка.....	W
Термическая обработка, приводящая к стабильному состоянию, отличному от F, O или H.....	T

Цифры от 1 до 10 после T указывают конкретную последовательность основных термических обработок:

Охлаждение полуфабрикатов после их изготовления при высокой температуре и естественное старение.....	T1
Отжиг.....	T2
Закалка с последующей холодной деформацией.....	T3
Закалка с последующим естественным старением и переходом к стабильному состоянию.....	T4
Охлаждение полуфабрикатов и искусственное старение.....	T5
Закалка и искусственное старение.....	T6
Закалка с последующей стабилизацией.....	T7
Закалка, холодная деформация и искусственное старение.....	T8
Закалка, искусственное старение и холодная деформация.....	T9
Охлаждение, искусственное старение и холодная деформация.....	T10

Дополнительные символы к обозначениям T1-T10 указывают на различия в термической обработке; так, для T-состояния полуфабрикатов, подвергнутых деформации для снятия напряжений, могут быть двух- и трехзначными и ставятся после основного обозначения состояния полуфабриката (например, T551: T6511).

В Японии используется та же система обозначений, что и в США.

### ***5.1.3. Система маркировки в Германии***

До недавнего времени система обозначений легких металлов и сплавов устанавливалась в соответствии с национальным стандартом DIN (1700; 1712; 1725.T1).

Сейчас для маркировки алюминия и алюминиевых сплавов в качестве национального стандарта был принят европейский стандарт EN 573-2:1994, разработанный в Техническом комитете (ТС) 132 «Алюминий и алюминиевые сплавы» Европейского комитета стандартизации (CEN).

Стандарт DIN EN 573-2:1994 предусматривает для алюминия и алюминиевых сплавов шифровые обозначения, соответствующие европейским нормам. Основой этих шифровых обозначений являются в первую очередь химические символы. Эта маркировка предусмотрена главным образом в качестве дополнения к нумерационной системе обозначения (четырёхзначной).

*Обозначение основных состояний деформируемых сплавов и полуфабрикатов, принятое в Германии*

Без термической обработки.....	wh, zh, 07-08, 20-39
Мягкое, отожженное.....	w, 10-19
Нагартованное.....	30
Нагартованное на 3/4 .....	28
Нагартованное на 1/2 .....	26
Нагартованное на 1/4 .....	24
Закаленное и естественно состаренное.....	41
Закаленное с температуры окончания горячей обработки давлением; искусственно состаренное на максимальную прочность.....	p
Закаленное, усиленно правленое растяжением, искусственно состаренное на максимальную прочность....	71-72

*Маркировка алюминия и алюминиевых деформируемых сплавов по DIN EN и DIN, Германия приведена в табл.11.*

## **5.2. Технический алюминий**

### **5.2.1. Химический состав**

В России производится технический алюминий по ГОСТ 11069-01 с химическим составом, приведенным в табл. 12. В соответствии с ГОСТ 11069-01 первичный алюминий классифицируют в зависимости от содержания примесей на 2 класса: высокой чистоты (А995, А99, А98, А97, А95) и технической чистоты (А85, А8, А7, А7Е, А7Э, А6, А5Е, А5, А35, А0).

Таблица 11

DIN EN 573-2		DIN 1712-3 или DIN 1725T1	
Нумерационное обозначение	Химический символ	Условное обозначение	Номер
EN AW-1050A	EN AW-Al99,5	Al 99,5	3.0255
EN AW-1070A	EN AW-Al99,7	Al 99,7	3.0275
EN AW-1200	EN AW-Al99,0	Al 99	3.0205
EN AW-1350	EN AW-EAl99,5	-	-
EN AW-2007	EN AW-AlCu4PbMgMn	AlCuMgPb	3.1645
EN AW-2011	EN AW-AlCu6BiPb	AlCuBiPb	3.1655
EN AW-2011A	EN AW-AlCu6BiPb(A)	-	-
EN AW-2014	EN AW-AlCu4SiMg	AlCuSiMn	3.1255
EN AW-2014A	EN AW-AlCu4SiMg(A)	-	-
EN AW-2017A	EN AW-AlCu4MgSi(A)	AlCuMg1	3.1325
EN AW-2024	EN AW-AlCu4Mg1	AlCuMg2	3.1355
EN AW-2030	EN AW-AlCu4PbMg	-	-
EN AW-3003	EN AW-AlMn1Cu	AlMnCu	3.0517
EN AW-3103	EN AW-AlMn1	AlMn1	3.0515
EN AW-5005	EN AW-AlMg1(B)	-	-
EN AW-5005A	EN AW-AlMg1(C)	AlMg1	3.3315
EN AW-5019	EN AW-AlMg5	AlMg5	3.3555
EN AW-5051A	EN AW-AlMg2(B)	AlMg1,8	3.3326
EN AW-5251	EN AW-AlMg2	AlMg2Mn0,3	3.3525
EN AW-5052	EN AW-AlMg2,5	AlMg2,5	3.3523
EN AW-5154A	EN AW-AlMg3,5(A)	-	-
EN AW-5454	EN AW-AlMg3Mn	AlMg2,7Mn	3.3537
EN AW-5754	EN AW-AlMg3	AlMg3	3.3535
EN AW-5083	EN AW-AlMg4,5Mn0,7	AlMg4,5Mn	3.3547
EN AW-5086	EN AW-AlMg4	AlMg4Mn	3.3545
EN AW-6101A	EN AW-EAlMgSi(A)	-	-
EN AW-6101B	EN AW-EAlMgSi(B)	E-AlMgSi0,5	3.3207
EN AW-6005	EN AW-AlSiMg	-	-
EN AW-6005A	EN AW-AlSiMg(A)	AlMgSi0,7	3.3210
EN AW-6106	EN AW-AlMgSiMn	-	-
EN AW-6012	EN AW-AlMgSiPb	AlMgSiPb	3.0615
EN AW-6018	EN AW-AlMg1SiPbMn	-	-
EN AW-6351	EN AW-AlSi1Mg0,5Mn	-	-
EN AW-6060	EN AW-AlMgSi	AlMgSi0,5	3.3206
EN AW-6061	EN AW-AlMg1SiCu	AlMgSiCu	3.3211
EN AW-6261	EN AW-AlMgSiCuMn	-	-
EN AW-6262	EN AW-AlMg1SiPb	-	-
EN AW-6063	EN AW-AlMg0,7Si	-	-
EN AW-6063A	EN AW-AlMg0,7Si(A)	-	-
EN AW-6463	EN AW-AlMg0,7Si(B)	-	-
EN AW-6081	EN AW-AlSi0,9MgMn	-	-
EN AW-6082	EN AW-AlSi1MgMn	AlMgSi	3.2315
EN AW-7003	EN AW-AlZn6Mg0,8Zr	-	-
EN AW-7005	EN AW-AlZn4,5Mg1,5Mn	-	-
EN AW-7020	EN AW-AlZn4,5Mg1	AlZn4,5Mg1	3.4335
EN AW-7022	EN AW-AlZn5Mg3Cu	AlZnMgCu0,5	3.4345
EN AW-7049A	EN AW-AlZn8MgCu	-	-
EN AW-7075	EN AW-AlZn5,5MgCu	AlZnMgCu1,5	3.4365

Основными примесями в техническом алюминии являются железо и кремний. Они во многом определяют уровень механических свойств алюминия. Например, Al высокой чистоты (99,998 %) имеют  $\sigma_B = 40$  МПа, а технический Al (99,7 %) –  $\sigma_B = 70...80$  МПа [34]. При наличии в фазовом составе алюминия свободного кремния при кристаллизации образуется эвтектика Al-Si, что развивает горячеломкость в широком интервале температур. Деформируемость технического алюминия выше при отсутствии свободного кремния, условием этого является отношение железа к кремнию, равное 1,5. Такие марки технического алюминия выпускаются по ГОСТ 4784-97 и их химический состав приведен в табл. 13.

Таблица 12

Химический состав алюминия первичного по ГОСТ 11069-01, %

Марка	Al, не менее	Примесь, не более								
		Si	Fe	Cu	Mg	Mn	Zn	Ga	Ti	Прочие
АЛЮМИНИЙ ВЫСОКОЙ ЧИСТОТЫ										
A995	99,995	0,015	0,0015	0,001	0,001	0,001	0,001	0,003	0,001	0,001
A99	99,99	0,003	0,003	0,002	0,02	0,001	0,003	0,003	0,002	0,001
A98	99,98	0,006	0,006	0,002	0,002	0,002	0,003	0,003	0,002	0,001
A97	99,97	0,015	0,015	0,005	0,002	0,005	0,003	0,003	0,002	0,002
A95	99,95	0,02	0,02	0,01	0,002	0,005	0,005	0,003	0,002	0,005
АЛЮМИНИЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЧИСТОТЫ										
A85	99,85	0,06	0,08	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,008	0,02
A8	99,8	0,1	0,12	0,01	0,02	0,02	0,04	0,03	0,01	0,02
A7	99,7	0,15	0,16	0,01	0,03	0,02	0,04	0,03	0,01	0,02
A7E	99,7	0,08	0,2	0,01	-	0,02	0,04	0,03	0,01 <sup>1)</sup>	0,02
A7Э	99,7	0,1	0,2	0,01	0,03	-	0,03	0,04	0,01 <sup>2)</sup>	0,03
A6	99,6	0,18	0,25	0,01	0,03	0,03	0,05	0,03	0,02	0,03
A5E	99,5	0,1	0,35 <sup>3)</sup>	0,02	-	0,03	0,04	0,03	0,015 <sup>1)</sup>	0,02
A5	99,5	0,25	0,3	0,02	0,05	0,03	0,06	0,03	0,02	0,03
A35	99,35	0,65	Si+Fe <sup>4)</sup>	0,05	0,05	0,05	0,1	-	0,02	0,03
A0	99	0,95	Si+Fe <sup>4)</sup>	0,05	0,05	0,05	0,1	-	0,02	0,03

Примечания, 1) для суммы титана, ванадия, хрома и марганца

2) массовая доля ванадия не более 0,03 %

3) допустимая массовая доля железа не менее 0,18 %

4) в документе о качестве указывается фактическое значение массовой доли железа и кремния отдельно.

Таблица 13

Химический состав алюминия и алюминиевых сплавов  
по ГОСТ 4784-97, %

Марка сплава	Цифровое обозначение	Al, не менее	Массовая доля элементов, %									Прочие примеси	
			Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Другие элементы	Каждая	Сумма
АЛЮМИНИЙ													
АДООО	-	99,8	0,15	0,15	0,03	0,02	0,02	-	0,06	0,02	-	0,02	-
АДОО	1010	99,7	0,2	0,25	0,03	0,03	0,03	-	0,07	0,03	-	0,03	-
АДООЕ	1010Е	99,7	0,1	0,25	0,02	0,01	0,02	0,01	0,04	-	В 0,02; Vn+Ti 0,02	0,02	0,1
АДО	1011	99,5	0,25	0,4	0,05	0,05	0,05	-	0,07	0,05	-	0,03	-
АДОЕ	1011Е	99,5	0,1	0,4	0,05	0,01	-	0,01	0,05	-	В 0,05; Vn+Ti 0,02	0,03	0,1
АД1	1013	99,3	0,3	0,3	0,05	0,025	0,05	-	0,1	0,15	-	0,05	-
АД	1015	99	Si+Fe 1		0,05	0,05	-	-	0,1	0,05	-	0,05	0,15
АД1пл	-	99,3	0,3	0,3	0,02	0,025	0,05	-	0,1	0,15	-	0,02	-

Третьей технологически значимой примесью технического алюминия является марганец, содержание которого не должно превышать 0,03 %. Уже при 0,05 % Mn формируется аномально крупное зерно в отожженных листах алюминия. Причиной этого можно считать то, что неоднородность (ликвационная) распределения марганца по объему зерен сохраняется после горячей и холодной деформации, что приводит к неоднородности температуры начала рекристаллизации в различных микрообъемах деформированных зерен и формированию крупного рекристаллизованного зерна в полуфабрикатах при медленном нагреве при отжиге.



Таблица 14

Химический состав алюминия по ISO 209-1:1989E

Марка сплава	Номер	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Zr	Примечания	Прочие		Al
												Каждый	Всего	
АЛЮМИНИЙ (серия 1000)														
A1 99,8(A)	1080A	0,15	0,15	0,03	0,02	0,02	-	0,06	0,02	-	Ga 0,03	0,02	-	99,8
Al 99,7	1070A	0,2	0,25	0,03	0,03	0,03	-	0,07	0,03	-	-	0,03	-	99,7
E-A1 99,7	1370	0,1	0,25	0,02	0,01	0,02	0,01	0,04	-	-	Ga 0,03; B 0,02; V+Ti 0,02	0,02	0,1	99,7
A1 99,6	1060	0,25	0,35	0,05	0,03	0,03	-	0,05	0,03	-	V 0,05	0,03	-	99,6
A1 99,5	1050A	0,25	0,4	0,05	0,05	0,05	-	0,07	0,05	-	-	0,03	-	99,5
E-A1 99,5	1350	0,1	0,4	0,05	0,01	-	0,01	0,05	-	-	Ga 0,03; B 0,05; V+Ti 0,02	0,03	0,1	99,5
A1 99,3	-	0,3	0,3	0,05	0,025	0,05	-	0,1	0,15	-	-	0,05	-	99,3
A1 99,0	1200	Si+Fe 1		0,05	0,05	-	-	0,1	0,05	-	-	0,05	0,15	99
Al 99,0Cu	1100	Si+Fe 0,95		0,05-0,2	0,05	-	-	0,1	-	-	Be 0,0008	0,05	0,15	99

В соответствии с международным стандартом ISO 209-1:1989E технический алюминий по химическому составу соответствует маркам, приведенным в табл. 14. Химический состав технического алюминия по немецкому стандарту DIN EN573-31:1994 приведен в табл. 15. Технический алюминий, производимый в США (ASTM) и в Японии (JIS), соответствует данным табл. 16.

Таблица 15

Химический состав технического алюминия  
по DIN EN 573-31:1994

Номер сплава	Марка	Основные компоненты											Прочие элементы		Al, не менее
		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ga	V	Ti	в отдельности	в сумме	
АЛЮМИНИЙ															
ENAW 1199	EN AW-Al 99,99	0,006	0,006	0,006	0,002	0,006	-	-	0,006	0,01	0,005	0,002	0,002	-	99,99
EN AW 1098	EN AW-Al 99,98	0,01	0,006	0,003	-	-	-	-	0,015	-	-	0,003	0,003	-	99,98
ENAW 1198	EN AW-Al 99,98(A)	0,01	0,006	0,006	0,006	-	-	-	0,01	0,01	-	0,006	0,003	-	99,98
EN AW 1090	EN AW-Al 99,90	0,07	0,07	0,02	0,01	0,01	-	-	0,03	0,03	0,05	0,01	0,01	-	99,9
EN AW 1085	EN AW-Al 99,85	0,1	0,12	0,03	0,02	0,02	-	-	0,03	0,03	0,05	0,02	0,01	-	99,85
ENAW1080A	EN AW-Al 99,8(A)	0,15	0,15	0,03	0,02	0,02	-	-	0,06	0,03	-	0,02	0,02	-	99,8
EN AW 1070A	EN AW-Al 99,7	0,2	0,25	0,03	0,03	0,03	-	-	0,07	-	-	0,03	0,03	-	99,7
ENAW 1370	EN AW-E Al 99,7	0,1	0,25	0,02	0,01	0,02	0,01	-	0,04	0,03	-	-	0,02	0,1	99,7
ENAW 1060	EN AW-Al 99,6	0,25	0,35	0,05	0,03	0,03	-	-	0,05	-	0,05	0,03	0,03	-	99,6
ENAW1050A	EN AW-Al 99,5	0,25	0,4	0,05	0,05	0,05	-	-	0,07	-	-	0,05	0,03	-	99,5
ENAW 1350	EN AW-E Al 99,5	0,1	0,4	0,05	0,01	-	0,01	-	0,05	0,03	-	-	0,03	0,1	99,5
ENAW1350A	EN AW-E Al 99,5(A)	0,25	0,4	0,02	-	0,05	-	-	0,05	-	-	-	0,03	-	99,5
EN AW 1450	EN AW-Al 99,5Ti	0,25	0,4	0,05	0,05	0,05	-	-	0,07	-	-	0,1-0,2	0,03	-	99,5
EN AW 1235	EN AW-Al 99,35	Si+Fe 0,65		0,05	0,05	0,05	-	-	0,1	-	0,05	0,06	0,03	-	99,35
ENAW 1200	EN AW-Al 99,0	Si+Fe 1		0,05	0,05	-	-	-	0,1	-	-	0,05	0,05	0,15	99
EN AW 1200A	EN AW-Al 99,0(A)	Si+Fe 1		0,1	0,3	0,3	0,1	-	0,1	-	-	-	0,05	0,15	99
EN AW 1100	EN AW-Al 99,0 Cu	Si+Fe 0,95		0,05-0,2	0,05	-	-	-	0,1	-	-	-	0,05	0,15	99

Таблица 16

**Химический состав технического алюминия  
по ASTM(США) и JIS (Япония)**

Номер сплава	Легирующие компоненты и примеси									Прочие примеси		Al
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Zr, Zr+Ti, V	Ti	в отдельности	в сумме	
<b>1085</b>	0,1	0,12	0,03	0,02	0,02	-	0,3	-	0,02	0,01	-	99,85
<b>1080</b>	0,15	0,15	0,03	0,02	0,02	-	0,3	-	0,03	0,02	-	99,8
<b>1070</b>	0,2	0,025	0,04	0,03	0,03	-	0,04	-	0,03	0,03	-	99,7
<b>1060</b>	0,25	0,35	0,05	0,03	0,03	-	0,05	-	0,03	0,03	-	99,6
<b>1050</b>	0,25	0,4	0,05	0,05	0,05	-	0,05	-	0,03	0,03	-	99,5
<b>1100</b>	Si+Fe 1		0,5-2	0,05	-	-	0,1	-	-	0,05	0,15	99
<b>1200</b>	Si+Fe 1		0,05	0,05	-	-	0,1	-	0,05	0,05	0,15	99
<b>1N00</b>	Si+Fe 1		0,05-0,2	0,05	0,1	-	0,1	-	0,1	0,05	0,15	99
<b>1N30</b>	Si+Fe 0,7		0,1	0,05	0,05	-	0,05	-	-	0,03	-	99,3

Установление соответствия между марками алюминия и алюминиевых деформированных сплавов, производимых по ГОСТам России и ASTM США, может быть осуществлено с помощью табл. П1, представленной в Приложении. Возможно также сопоставление марок сплавов по их основным механическим свойствам, полученным после горячего прессования и термической обработки (табл. П2) [51].

### **5.2.2. Сопротивление деформации технического алюминия**

Обзор исследовательских работ, посвященных изучению сопротивления деформации технически чистого алюминия, приведен в работе [27].

Одними из первых технический алюминий при пластической деформации исследовали Надаи и Мэнджойн. Ими были получены кривые  $\sigma_s$  в зависимости от температуры и скорости деформации ( $\dot{\epsilon}=10^{-3} \dots 10^3 \text{ с}^{-1}$ ). Испытания проводились на растяжение. Отмечается, что из-за значительных инерционных погрешностей измерительной системы данные, полученные при больших скоростях деформации, весьма противоречивы.

Испытания на осадку технически чистого алюминия были выполнены Адлером и Филлинсом еще в 50-х годах прошлого столетия, а позднее Арнольдом и Паркером. Использовался кулачковый пластометр при реализации скоростей деформации от 1 до 30  $\text{с}^{-1}$ . По оценке самих исследователей, постоянство скорости деформации не соблюдалось. Кривые зависимости  $\sigma_s$  от  $\dot{\epsilon}$  при 300 $^{\circ}\text{C}$  и  $\epsilon > 0,3$  проходили параллельно оси  $\dot{\epsilon}$ . В 60-е годы предыдущего столетия испытания на осадку чистого алюминия осуществлены Л.Д.Соколовым при термообработках до 500 $^{\circ}\text{C}$  и при  $\dot{\epsilon} = 10^{-4} \dots 6 \text{ с}^{-1}$ , на основе которых ав-

тор отмечает рост скоростного упрочнения с ростом как скорости, так и температуры деформации. В те же годы широкие исследования сопротивления деформации алюминия проведены Хоккеттом на кулачковом пластометре при  $\dot{\varepsilon} = 0,1 \dots 200 \text{ с}^{-1}$  в диапазоне температур от  $-50$  до  $400^\circ\text{C}$ . Полученные зависимости вполне удовлетворительно были описаны зависимостью  $\sigma_s = K \lg \dot{\varepsilon} + \sigma_0$ , где  $K$  и  $\sigma_0$  зависели от температуры и степени деформации.

Высокоскоростные испытания ( $\dot{\varepsilon} = 110 \dots 260 \text{ с}^{-1}$ ) технического алюминия были проведены значительно позднее Самантом на ротационном пластометре при температурах от  $250$  до  $500^\circ\text{C}$ .

Далее приводятся зависимости сопротивления деформации технически чистого алюминия от степени, температуры и скорости деформации, опубликованные в общедоступной литературе.

При холодной и теплой деформации основным фактором, влияющим на сопротивление деформации, является степень деформации. Однако во многих исследованиях выявлено также определенное изменение  $\sigma_s$  с ростом скорости деформации. Надежного объяснения этого явления пока не найдено, и связь  $\sigma_s$  с  $\dot{\varepsilon}$  при температурах, существенно ниже температуры начала рекристаллизации, остается признать и использовать в технологических расчетах.

В условиях горячей деформации наиболее сильно влияющими на величину  $\sigma_s$  параметрами признаются температура и скорость деформации. Данные о влиянии степени деформации весьма противоречивы. Более того, многие исследователи считают, что принимать независимость  $\sigma_s$  от  $\dot{\varepsilon}$  вполне допустимо в технологическом проектировании. Такие процессы, как горячее прессование, характеризуются очень высокими значениями  $\varepsilon = \ln \lambda$ , где  $\lambda$  — вытяжка, не достижимыми при пластометрических исследованиях. Поэтому информация о влиянии больших степеней деформации на сопротивление горячей деформации полностью отсутствует, и учет этого влияния может осуществляться лишь на уровне гипотез. Например, в работе [38] по этому поводу отмечается следующее: «Вследствие ограниченности данных по  $\sigma_s$  алюминиевых сплавов, полученных при испытании на кручение, приходится использовать результаты испытаний на растяжение и сжатие. Степени деформации, достижимые в этих процессах, значительно ниже, чем реализуемые при прессовании. Однако, как отмечено в ряде работ, при  $\varepsilon = 0,2 \dots 0,5$  наблюдается перегиб кривых  $\sigma_s = f(\varepsilon)$  или резкое затухание их подъема. Это под-

тверждается результатами, полученными при испытании на кручение...». Стоит отметить, что даже испытания на кручение не могут по величине степени деформации соответствовать прессованию, где вытяжки достигают значений 600 и более и, следовательно, степень деформации оценивается величиной  $\varepsilon = 6,4$  и более. В связи с этим многие авторы предлагают при технологических расчетах процессов с высокими степенями деформации принимать  $\sigma_s$ , соответствующую максимуму на кривой  $\sigma_s = f(\varepsilon)$ , и влияние больших значений  $\varepsilon$  не учитывать. Вследствие возможного разупрочнения металла при высоких значениях  $\varepsilon$  (с ростом  $\varepsilon$  увеличивается скорость динамического разупрочнения) результаты расчетов оказываются завышенными, что при выборе деформирующего оборудования гарантирует определенный запас силовых возможностей машин и запас прочности деформирующего инструмента.

Диапазоны исследуемых скоростей деформации при проведении пластометрических испытаний чрезвычайно широки, поэтому при использовании кривых упрочнения лучше рассматривать и возможно линейно аппроксимировать лишь участки кривых, соответствующих диапазону скоростей деформации в проектируемом процессе ОМД. Ориентировочно эти диапазоны представляются следующим образом [10]:

– изотермическое (изостатическое) деформирование	$\dot{\varepsilon} = 10^{-3} \dots 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ ;
– прессование	$\dot{\varepsilon} = 10^{-2} \dots 10 \text{ с}^{-1}$ ;
– горячая прокатка	$\dot{\varepsilon} = 10 \dots 100 \text{ с}^{-1}$ ;
– штамповка на прессах	$\dot{\varepsilon} = 10 \dots 100 \text{ с}^{-1}$ ;
– ковка на молотах	$\dot{\varepsilon} = 10 \dots 1000 \text{ с}^{-1}$ ;
– электроимпульсная, взрывная штамповка	$\dot{\varepsilon} = 1000 \dots 10000 \text{ с}^{-1}$ .

Для расчета средней скорости деформации  $\dot{\varepsilon}_{\text{ср}}$  в зоне обжатия можно использовать следующие формулы [40]:

– для плоской и сортовой прокатки

$$\dot{\varepsilon}_{\text{ср}} = K \frac{V_1 l}{R h_0},$$

где  $V_1$  – скорость полосы на выходе из клетки;

$l = \sqrt{\Delta h R}$  – длина очага деформации;

$\Delta h$  – абсолютное обжатие;

$h_0$  – исходная высота полосы;

$R$  – радиус валков (катающий радиус при сортовой прокатке);



$K = 1$  для гладких валков;  $K = 1,5$  для квадратных и ромбических калибров;  $K = 1,33$  для овальных, круглых и ребровых овальных калибров;

– для прессования и волочения прутков и профилей

$$\dot{\varepsilon}_{\text{ср}} = \frac{G \ln \lambda \operatorname{tg} \varphi}{(\lambda \sqrt{\lambda} - 1) d_1} V_1,$$

где  $\lambda$  – вытяжка;

$\varphi$  – полуугол конуса матрицы или волокна (для плоских матриц принимают  $\varphi = 60^\circ$ );

$d_1$  – средний диаметр сечения прутка или профиля на выходе из матрицы (волокна);

$V_1$  – скорость истечения или скорость волочения;

– для прокатки и обкатки труб

$$\dot{\varepsilon}_{\text{ср}} = \frac{\pi \ln \lambda V D}{L b},$$

где  $L = \frac{\Delta h h_0}{h \operatorname{tg} \alpha}$  – длина зоны контакта с учетом вытяжки;

$b = \sqrt{R_{\text{пр}} \Delta h}$  – ширина зоны контакта;

$R_{\text{пр}} = \frac{2R\rho}{R + \rho}$  – приведенный радиус;

$D$  – внутренний диаметр трубы или диаметр оправки;  $D = 2R$ ;

$\rho$  – радиус роликов;

$\alpha$  – угол наклона роликов;

$V$  – окружная скорость роликов;

– дляковки и штамповки

$$\dot{\varepsilon}_{\text{ср}} = \frac{V_{\text{деф}}}{h_{\text{ср}}} = \frac{\bar{\varepsilon}}{t},$$

где  $V_{\text{деф}}$  – скорость бойков или штампов;

$h_{\text{ср}}$  – средняя высота деформируемой заготовки;

$t$  – время деформирования.

Приведенные в литературе кривые степенного упрочнения, полученные в результате испытаний на растяжение образцов, изготовленных из предварительно прокатанных или холоднокатаных листов или прутков, достаточно неоднозначно представляют зависимость сопротивления деформации. Это связано с тем, что зачастую алюминий технической чистоты предоставляется даже без указания его

марки, или без указания содержания примесей в марочном алюминии. Кроме того, далеко не всегда удастся узнать ориентировку образцов в исходном холоднодеформированном материале. Не всегда указывается, какой величиной оценивается степень деформации при холодном деформировании прокаткой и волочением.

На рис. 58 и 59 приведены кривые степенного упрочнения, полученные растяжением образцов, вырезанных из холоднокатаных листов [25].

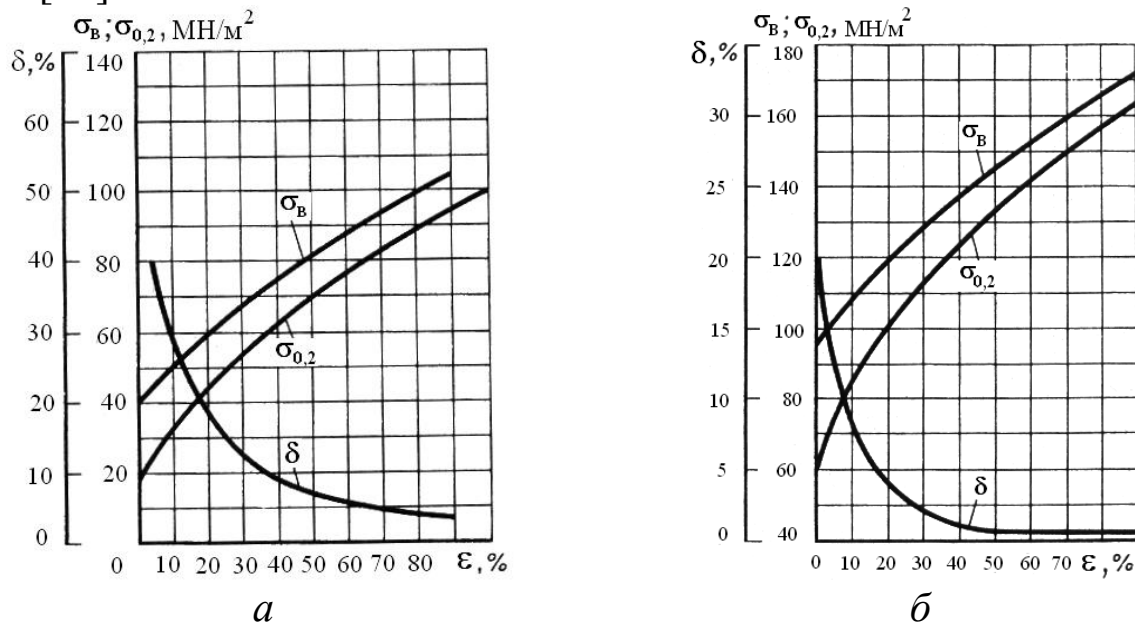


Рис. 58. Кривые деформационного упрочнения технического алюминия марок А00(а) и А1 (б) [25]

Кривые упрочнения, полученные испытанием на сжатие образцов из прутковых заготовок, отожженных либо деформированных в горячем или холодном состояниях [11], приведены на рис. 60 и 61.

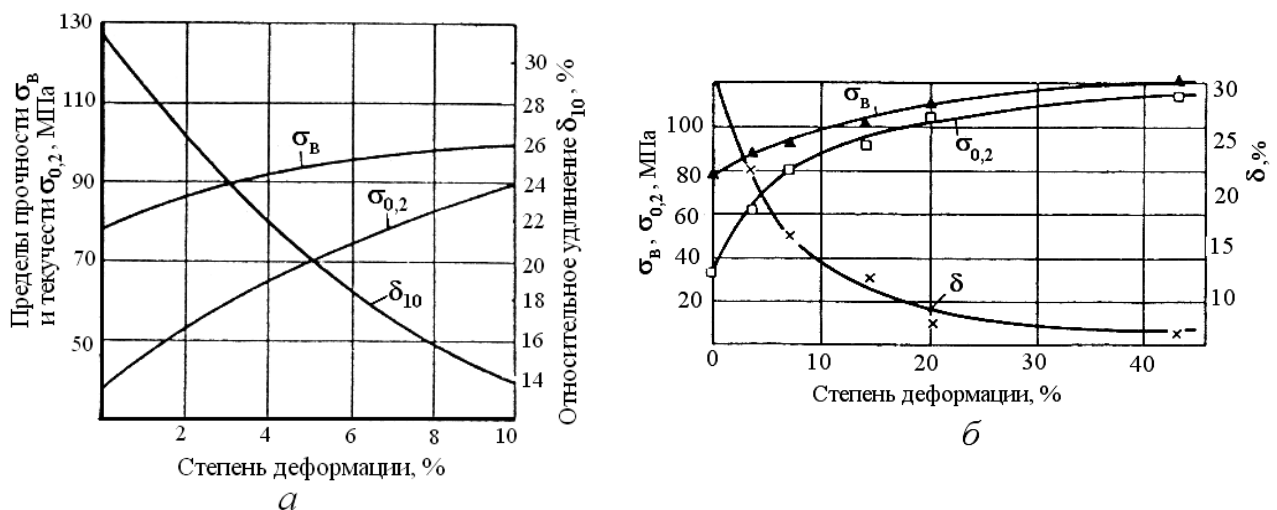


Рис. 59. Изменение механических свойств сплава АД1 при холодной деформации: [47] (а) и [46] (б)

Методами испытаний на сжатие на кулачковых и ротационных пластометрах получены зависимости сопротивления деформации в холодном состоянии от скорости деформации как для высокочистого (рис. 62), так и технического алюминия (рис. 63).

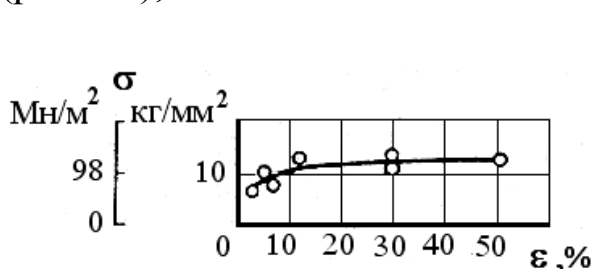


Рис. 60. Кривая упрочнения при сжатии технически чистого алюминия

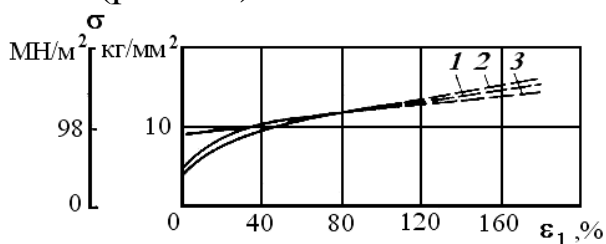


Рис. 61. Кривые упрочнения при сжатии алюминиевого сплава Al99,5:  
1 – отожженного; 2 – горячештампованного; 3 – холоднотянутого со степенью обжатия 40 %

На рис. 64 и 65 представлены кривые упрочнения высокочистого алюминия при горячей деформации, полученные соответственно на кулачковом и торсионном пластометрах. На них учитывается степень ( $\epsilon$  или  $\gamma$ ), скорость и температура деформации в диапазонах варьирования, соответствующих прокатке и ковке алюминия [17].

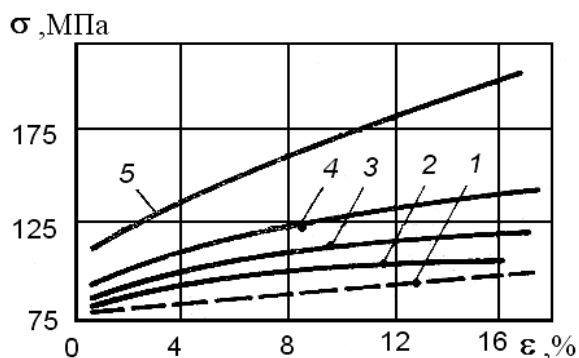


Рис. 62. Кривые деформационного упрочнения высокочистого алюминия (99,99 %) при 20 С° в условиях высокоскоростного нагружения:

1 – статическое испытание; 2 – 10;  
3 – 100; 4 – 1000; 5 – 10000 с<sup>-1</sup>

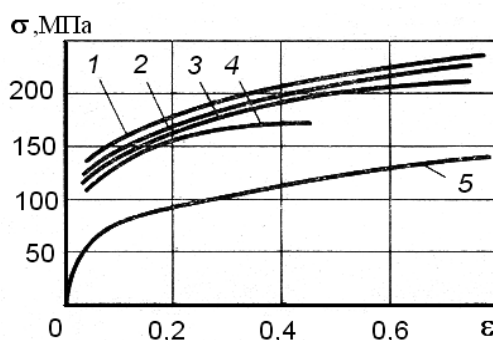


Рис. 63. Кривые деформационного упрочнения алюминия (99,4 %) при высокоскоростном сжатии в условиях комнатной температуры. Скорость нагружения, м/с: 1 – 206; 2 – 183; 3 – 137; 4 – 97;

5 – статические испытания

Под  $\bar{\epsilon}$  на рис. 64 понимается средняя за процесс осадки логарифмическая степень деформации, а под  $\sigma$  – напряжение осадки без учета бочкообразования  $\sigma = \frac{P}{F_i}$ , где  $F_i = \frac{\pi}{4} d_0^2 \frac{h_0}{h_i}$ ;  $h_0$  и  $h_i$  – начальная и

конечная высота при  $i$ -м испытании. Эти напряжения и приняты в качестве оценки сопротивления деформации.

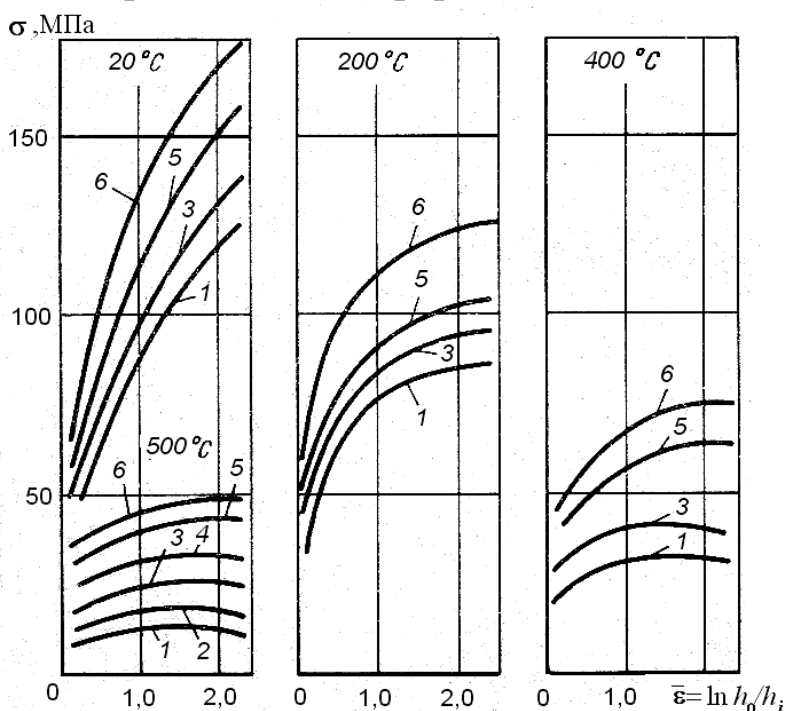


Рис. 64. Кривые деформационного упрочнения высокочистого алюминия (99,99 %). Скорость деформации,  $\text{с}^{-1}$ : 1 – 0,4; 2 – 2; 3 – 9; 4 – 41; 5 – 101; 6 – 203

На рис. 65 степень деформации оценивается величиной  $\gamma = \text{tg}\varphi$ , где  $\varphi$  – угол скручивания, приведенный к базовой длине образца. Сопротивление деформации сдвига представлено максимальным касательным напряжением при скручивании сплошного образца, определяемым по формуле Надаи [14]:

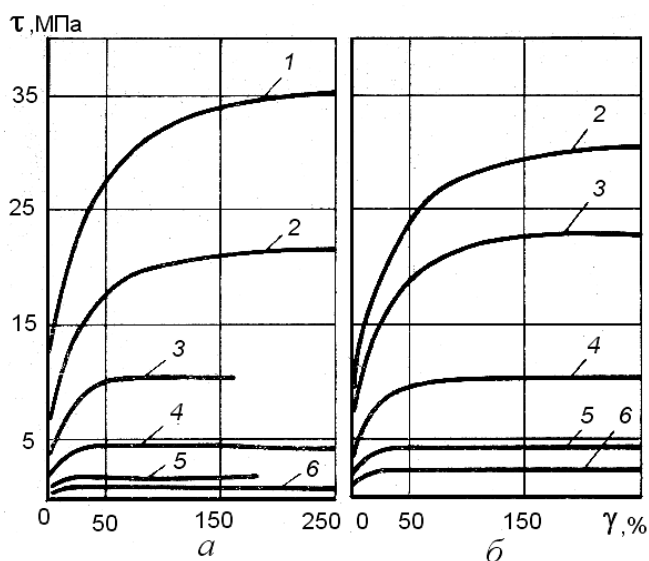


Рис. 65. Кривые испытаний на кручение высокочистого алюминия (99,995 %, горячепрессованный) при скорости деформации  $2,4 \cdot 10^{-3}$  (а) и  $0,12 \text{ с}^{-1}$  (б). Температура,  $^{\circ}\text{C}$ : 1 – 99; 2 – 192; 3 – 285; 4 – 378; 5 – 471; 6 – 564

$$\tau = \tau_{\max} = \frac{3,2M_{\text{кр}}}{2\pi r^3},$$

где  $M_{\text{кр}}$  – крутящий момент при угле скручивания  $\varphi$ ;

$r$  – радиус сечения образца, принимаемый постоянным во время испытания.

Кривых упрочнения технического алюминия различных марок и различной степени чистоты в литературе представлено достаточно много. Все они получены при испытаниях на осадку на кулачковых пластометрах при широких диапазонах изменения температуры и скорости деформации, но при достаточно малых степенях деформации. Поэтому использовать эти данные по сопротивлению деформации для технологических расчетов процесса прессования можно только в рамках принятых допущений с сохранением максимальных значений  $\sigma_s$  при деформациях, превышающих учитываемые при построении приведенных на рис. 66-73 кривых упрочнения технически чистого алюминия [10, 17, 41].

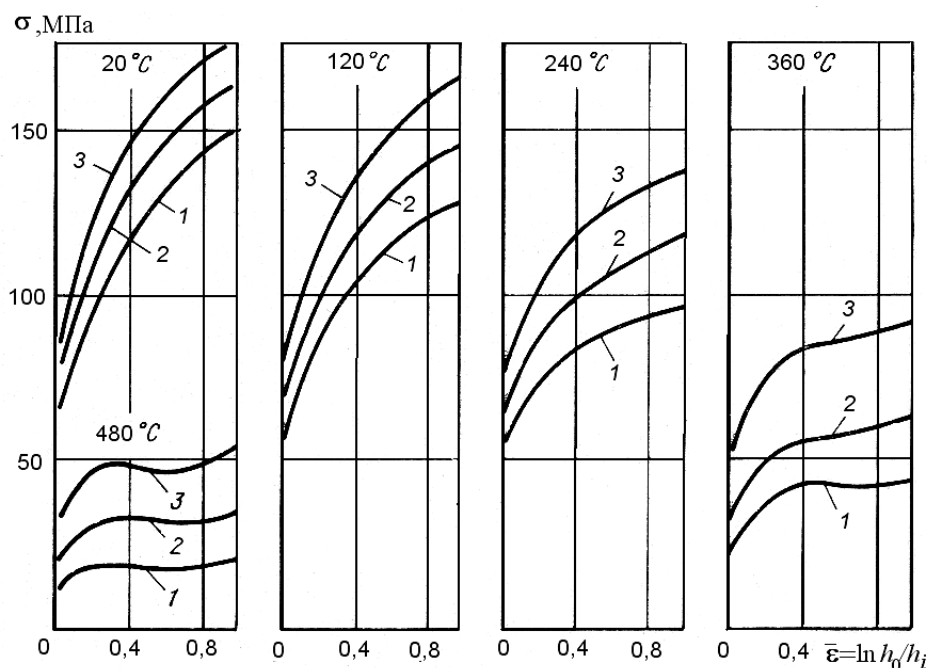


Рис. 66. Кривые деформационного упрочнения алюминия (99,5 %).  
Скорость деформации, с<sup>-1</sup>: 1 – 0,25; 2 – 4; 3 – 63

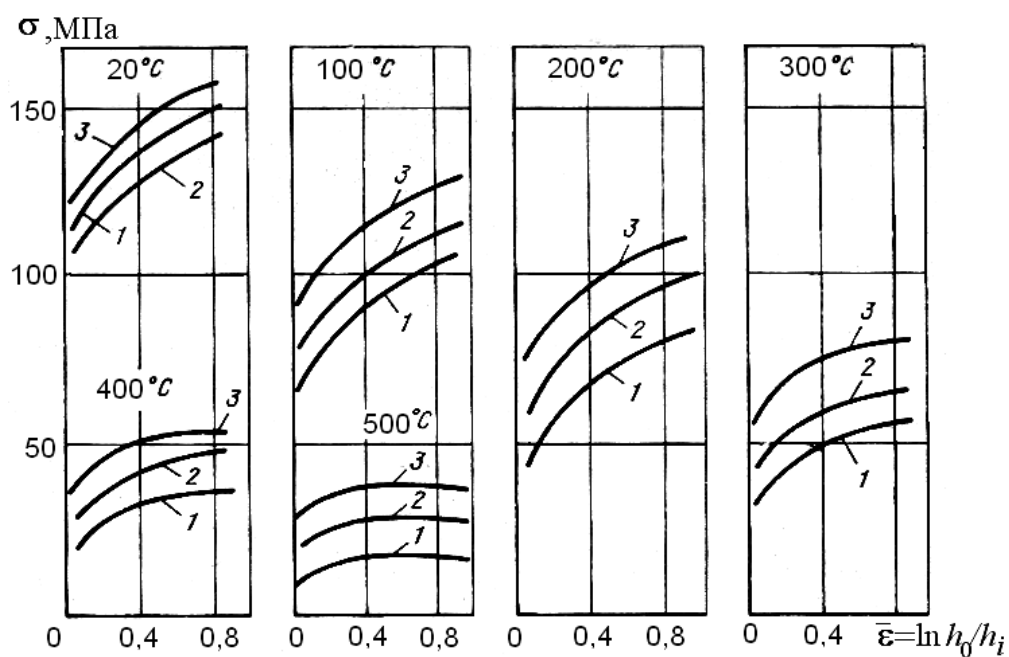


Рис. 67. Кривые деформационного упрочнения горячепрессованного алюминия АД1 (99,5 %). Скорость деформации,  $s^{-1}$ : 1 – 1; 2 – 10; 3 – 200

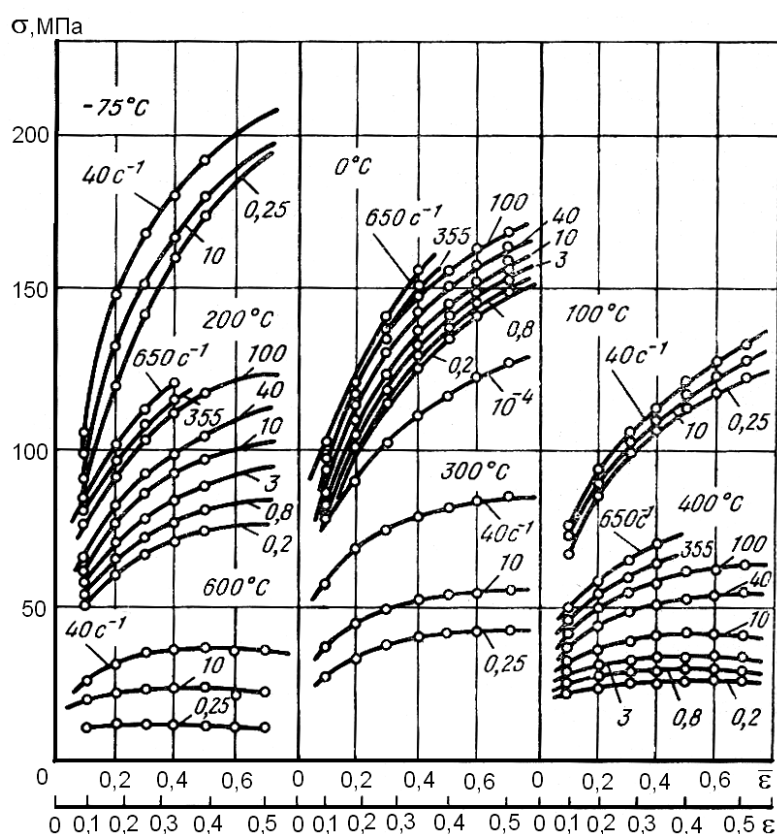


Рис. 68. Кривые деформационного упрочнения алюминия (99,5 %); образцы после волочения и отжига

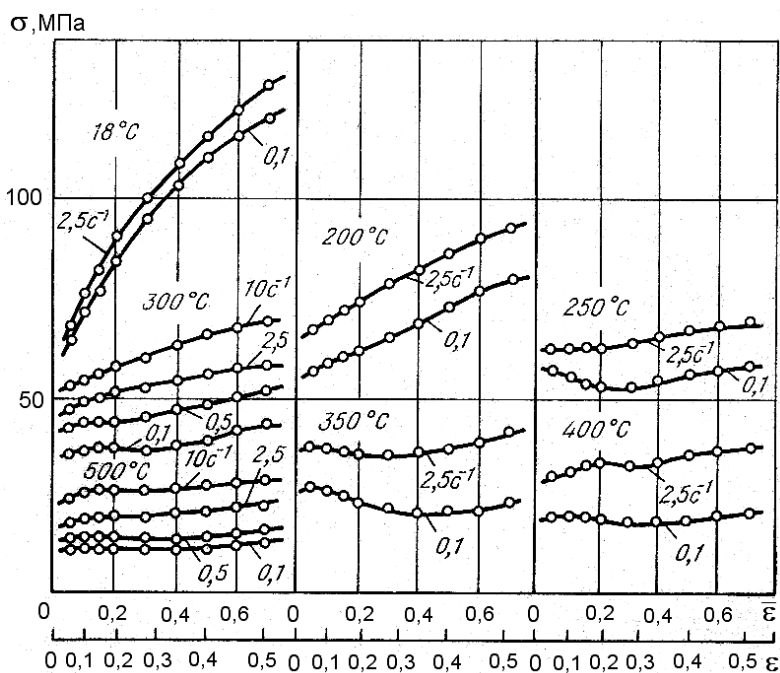


Рис. 69. Кривые деформационного упрочнения алюминия (99,7 %).  
Образцы горячепрессованные и отожженные после волочения  
размером 12x18 мм испытывали на сжатие

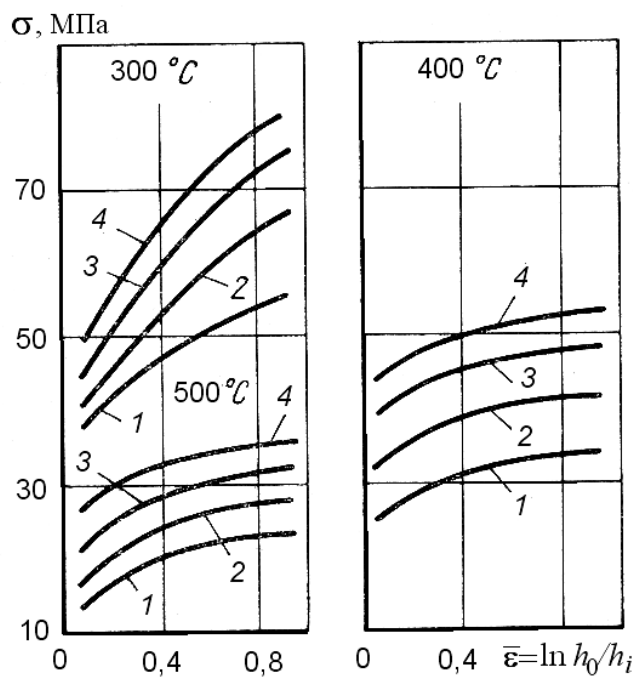


Рис. 70. Кривые деформационного упрочнения алюминия (99,55 %).  
Скорость деформации,  $\text{с}^{-1}$ : 1 – 1; 2 – 10; 3 – 20; 4 – 30

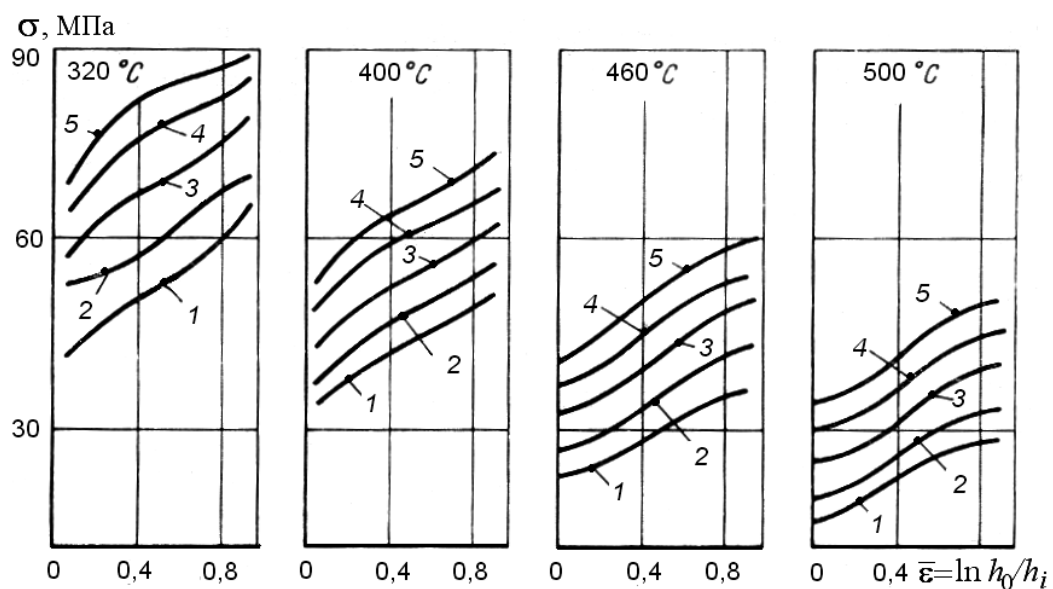


Рис. 71. Кривые деформационного упрочнения технически чистого алюминия.  
Скорость деформации,  $\text{с}^{-1}$ : 1 – 0,5; 2 – 5; 3 – 20; 4 – 40; 5 – 60

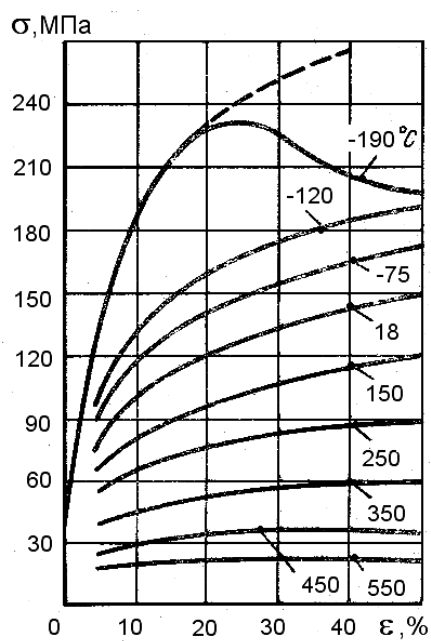


Рис. 72. Кривые деформационного упрочнения алюминия (99,3 %)  
при  $\dot{\epsilon} = 4,38 \text{ с}^{-1}$



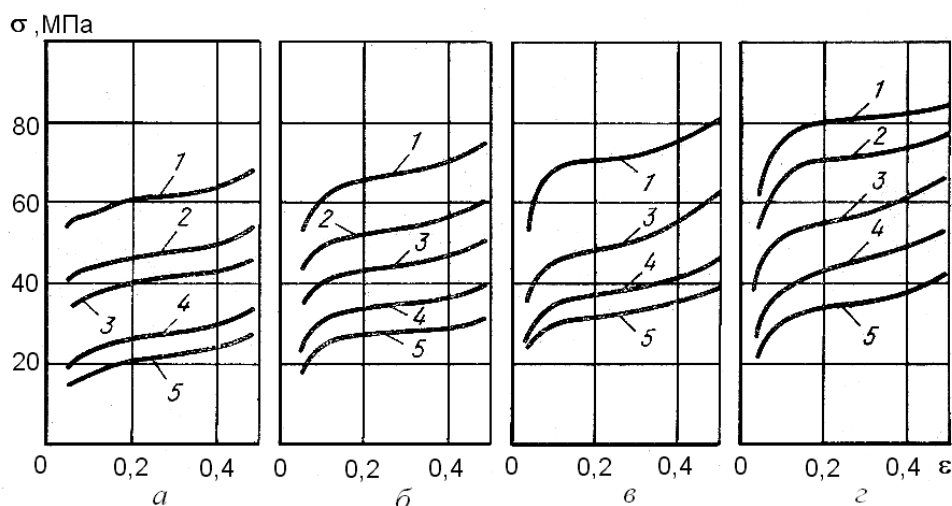


Рис. 73. Кривые деформационного упрочнения алюминия марки А7 при скорости деформации 1 (а), 10 (б), 100 (в) и 300 с<sup>-1</sup> (г). Температура, С°: 1 – 300; 2 – 350; 3 – 400; 4 – 500; 5 – 600

Существенный разброс значений сопротивления деформации при, казалось бы, одних и тех же марках технического алюминия связан с неучетом перечисленных выше факторов и в первую очередь с отсутствием анализа влияния примесей. В последнем обстоятельстве важным является учет соотношения концентраций железа и кремния. Для оценки пригодности приведенных графиков текучести для анализа реальных процессов ОМД не хватает данных о технологии изготовления заготовок и о способе изготовления образцов из этих заготовок.

На рис. 74 приводятся кривые упрочнения технического алюминия, пригодные для их аппроксимации методом термомеханических коэффициентов [25]:  $\sigma_{02} = \sigma_0 K_\varepsilon K_t K_u$ , где  $\sigma_0$  – сопротивление деформации при базовом режиме

$$\sigma_0 = \sigma \left|_{\substack{\varepsilon = \varepsilon_0 \\ t = t_0 \\ u = u_0}} \right.; \quad u - \text{скорость деформации.}$$

Функции термомеханических коэффициентов построены таким образом, что

$$K_{\varepsilon|\varepsilon=\varepsilon_0} = 1; \quad K_{t|t=t_0} = 1; \quad K_{u|u=u_0} = 1.$$

Функции меняются при выборе других базовых значений  $\varepsilon_0$ ,  $t_0$  и  $u_0$ . В приведенном на рис. 74 виде функции соответствуют  $\sigma_0 = 36$  МПа [25]. Поскольку пластометрические исследования проводились на кулачковом пластометре Уралмашзавода методом осадки, оценка сопротивления деформации величиной  $\sigma_{02}$  трудно объяснима. При

этом виде испытаний определение  $\sigma_{02}$  весьма затруднительно. Примененный пластометр позволяет осуществлять испытания на растяжение, однако обеспечить одноосную деформацию при  $\varepsilon = 0,5$  без образования шейки невозможно, по крайней мере для алюминия и его сплавов. Такие относительные удлинения возможны лишь у сплавов Al-Zn при содержании цинка около 20 %.

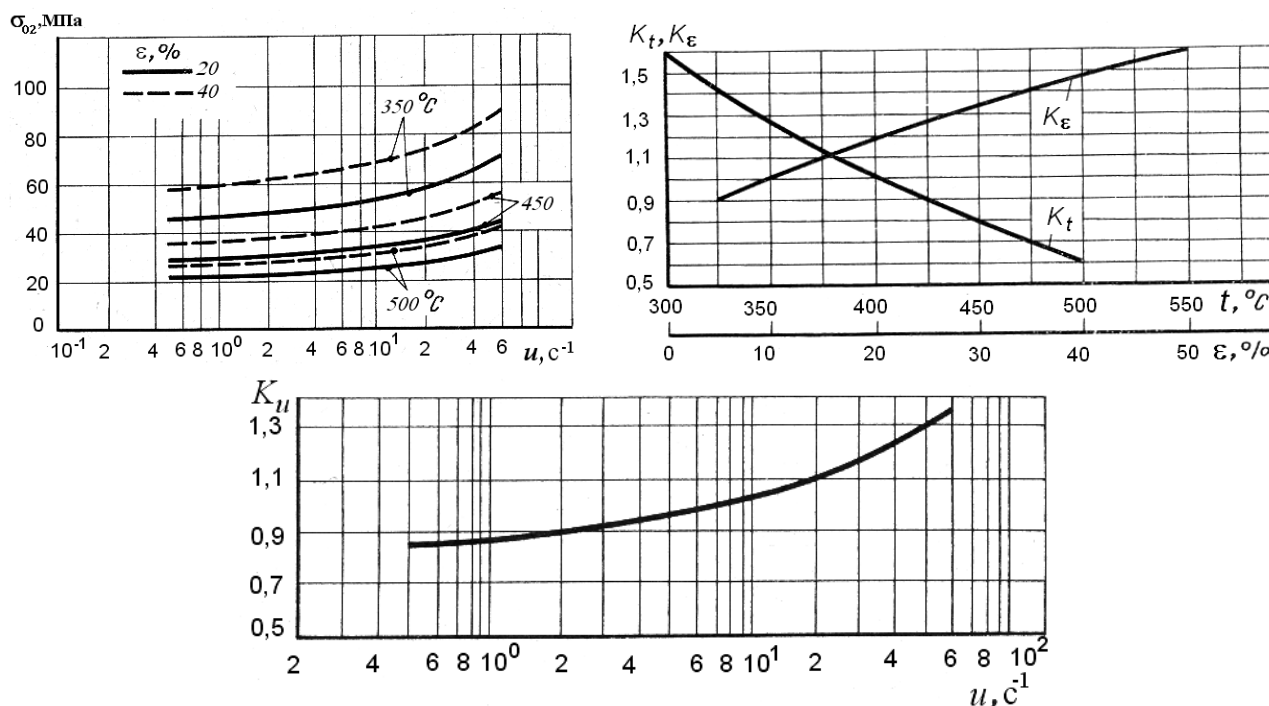


Рис. 74. Сопротивление деформации технически чистого алюминия ( $\geq 98,80\%$ )

Кривые упрочнения для технического алюминия, полученные авторами [27] в результате испытаний на растяжение и сжатие на кулачковом пластометре и приведенные на рис. 75, достаточно хорошо аппроксимируются полиномом второй степени вида

$\sigma_s = \sigma_0 + (\lg \dot{\varepsilon})[a + b(\lg \dot{\varepsilon})]$ , где  $\dot{\varepsilon}$  находится в интервале от 1 до  $200 s^{-1}$ , а  $\sigma_0 = \sigma|_{\dot{\varepsilon}=1 s^{-1}}$ . При этом коэффициенты  $a$  и  $b$  определяются

по опытным данным методом наименьших квадратов.

Как уже отмечалось, построить кривые упрочнения для всего практически применяемого диапазона степеней деформации нельзя, используя стандартизованные и экспериментальные методы пластометрических испытаний. В связи с этим в работе [38] предлагается для оценки сопротивления деформации при прессовании считать прямой функцией температуры и длительности деформации  $\tau_d$ .

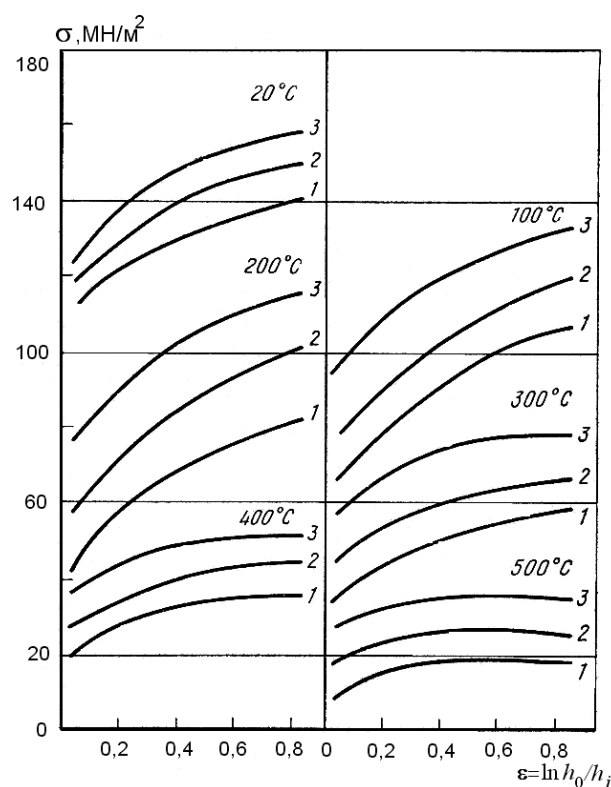


Рис. 75. Кривые испытаний на пластометре сплава АД1:  
 1 –  $\xi = 1 \text{ c}^{-1}$ ; 2 –  $\xi = 10 \text{ c}^{-1}$ ; 3 –  $\xi = 200 \text{ c}^{-1}$

Поэтому при испытаниях на растяжение или сжатие для определения  $\sigma_s$  рекомендуется лишь соблюдать температурно-скоростные условия, идентичные условиям изучаемого процесса прессования, т.е. поддерживать температуру на заданном уровне и обеспечивать равенство длительности деформации как при испытаниях так и в реальном процессе прессования. Такие диаграммы текучести были построены для технического алюминия марки АД1 (рис. 76) и для ряда сплавов алюминия [38].

Для использования при технологическом проектировании этих зависимостей требуется на уровне некоторой гипотезы определиться с понятием длительности деформации  $\tau_d$  при прессовании. Можно предполагать, что под  $\tau_d$  понимается время перехода материальной частицы деформируемого металла в пластическую зону очага деформации. При этом следует считаться с неопределенностью положения границы пластической зоны. Само понятие границы пластической зоны является приемом идеализации схемы течения металла, упрощающим теоретический анализ процесса. Объем пластической зоны обычно ограничивают конической поверхностью

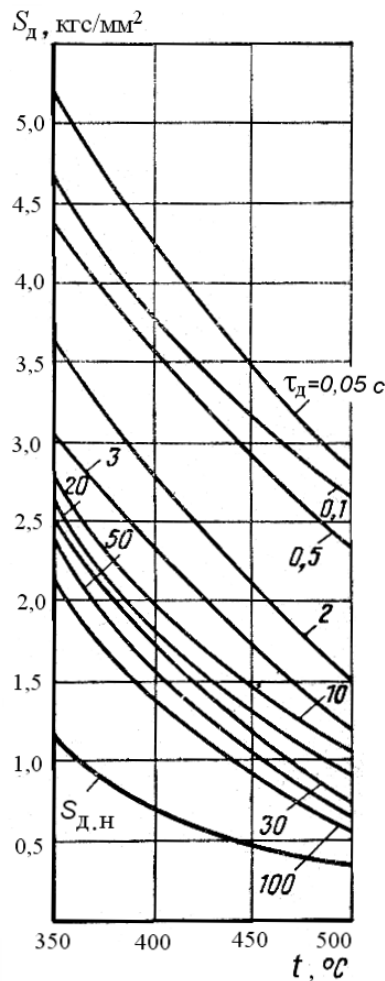


Рис. 76. Зависимость сопротивления деформированию  $S_d$  сплава АД1 от температуры  $t$  и длительности деформации  $\tau_d$

матрицы (или границей «мертвой зоны матрицы») и двумя сферическими поверхностями с радиусами  $R_0 = \frac{D}{2 \sin \alpha}$  и  $R_1 = \frac{d}{2 \sin \alpha}$ , где  $D$  – диаметр контейнера;  $d$  – диаметр прессуемого прутка;  $\alpha$  – полуугол рабочего конуса матрицы.

Для случая прессования через плоскую матрицу угол  $\alpha$  характеризует положение границы «мертвой зоны» матрицы и принимается равным  $60^\circ$ .

Введя систему координат, поместив значение  $x = 0$  на входе в пластическую зону, можно записать условие постоянства объемов в виде

$$V_0 R_0^2 = V_x \left( R_0 + \frac{x}{a} \right)^2,$$

где  $V_x$  – текущее значение скорости течения металла в направлении оси  $x$ ;

$V_0$  – скорость прессования;

$x$  – текущая координата, изменяющаяся при прессовании от 0 до  $l$ ;

$l = \frac{D-d}{2 \operatorname{tg} \alpha}$  – длина пластической зоны;

$a = -\frac{1}{\operatorname{tg} \alpha \cdot \sin \alpha}$ ; если  $\alpha = 60^\circ$ , то  $a = -\frac{1}{1,5} \approx -0,67$ .

$$\text{Следовательно, } V_x = \frac{V_0 R_0^2}{(R_0 + ax)^2}, \text{ а } \tau_d = \int_0^l \frac{dx}{V_x} = \frac{1}{V_0 R_0^2} \cdot \int_0^l (R_0 + ax)^2 dx =$$

$$= \frac{1}{V_0 R_0 3a} [R_0^3 - (R_0 + al)^3]; \text{ при } \alpha = 60^\circ \quad \tau_d = \frac{(R_0 - 0,67l)^3 - R_0^3}{2V_0 R_0}.$$

В пластометрических исследованиях на осадку, выполненных автором [13] на кулачковом пластометре при степени деформации  $\varepsilon \approx 0,5$ , учитывалось влияние на сопротивление деформации, оцениваемое величиной  $\sigma_{02}$ , температуры и скорости деформации. На рис. 77 приведены опытные данные по величине сопротивления деформации высокочистого технического алюминия и их полиномиальные аппроксимации.

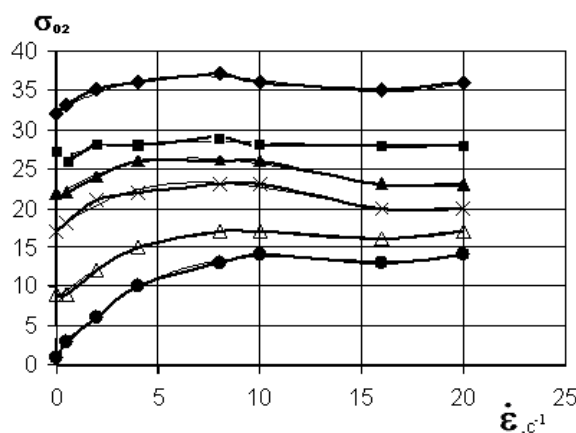


Рис. 77. Сопротивление деформации (МПа) сплава АД00 в литом состоянии при различных скоростях и температурах деформации:

◆ – 50°C; ■ – 150°C; ▲ – 250°C; × – 350°C; Δ – 450°C; ● – 500°C

Точность аппроксимации оценивалась значениями квадратов смешанной корреляции

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (\lambda_{\pi i} - \hat{\lambda}_{\pi i})^2}{\left( \sum \lambda_{\pi i}^2 \right) - \frac{(\sum \lambda_{\pi i})^2}{n}},$$

где  $n$  – объем выборки;  $\lambda_{pi}$  –  $i$ -е опытное значение;  $\hat{\lambda}_{pi}$  –  $i$ -е значение аппроксимации.  $R^2 = 1$  при аппроксимации самого полинома.

Значение  $\sigma_{02}$  определены на кулачковом пластометре, изображенном на рис. 28, при испытании на растяжение образцов диаметром 5 мм с расчетной длиной 25 мм. Во время испытаний осуществлялась диаграммная запись  $P - \Delta l$  на шлейфовом осциллографе, по которой определялась величина условного предела текучести.

### 5.3. Сплавы системы Al-Mn

Сплавы этой системы широко применяются в промышленности, особенно в виде листовых полуфабрикатов, поскольку обладают по сравнению с техническим алюминием повышенной прочностью, пластичностью, технологичностью и коррозионной стойкостью.

В России сплавы системы (Al-Mn) производят по ГОСТ 4784-97, их химический состав приведен в табл. 17.

Химический состав сплавов системы (Al-Mn), производимых по стандарту ISO209-1:1989E, приведен в табл.18, по стандарту DIN EN573-31:1994, Германия – в табл. 19.

Таблица 17

Химический состав алюминиевых сплавов по ГОСТ 4784-97, %

Марка сплава	Цифровое обозначение	Al, не менее	Массовая доля элементов, %									Прочие примеси	
			Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Другие элементы	Каждая	Сумма
АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ СИСТЕМЫ АЛЮМИНИЙ-МАРГАНЕЦ (Al-Mn)													
ММ	1403	остальное	0,6	0,7	0,3	1-1,5	0,2-0,6	0,1	0,25	0,1	-	0,05	0,15
АМц	1400	остальное	0,6	0,7	0,05-0,2	1-1,5	-	-	0,1	-	-	0,05	0,15
АМцС	1401	остальное	0,15-0,35	0,25-0,45	0,1	1-1,4	0,05	-	0,1	0,1	-	0,05	0,1
Д12	1521	остальное	0,3	0,7	0,25	1-1,5	0,8-1,3	-	0,25	-	-	0,05	0,15

Таблица 18

Химический состав алюминиевых деформируемых сплавов по ISO209-1:1989E, % не более

Марка сплава	Номер**	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Zr	Примечания	Прочие		Al
												Каждый	Всего	
Al-Mn (Серия 3000)														
AlMn0,5Mg0,5	3105	0,6	0,7	0,3	0,3-0,8	0,2-0,8	0,2	0,4	0,1	-	-	0,05	0,15	остальное
AlMn1	3103	0,5	0,7	0,1	0,9-1,5	0,3	0,1	0,2	-	-	Ti+Zr 0,1	0,05	0,15	остальное
AlMn1Cu	3003	0,6	0,7	0,05-0,2	1,0-1,5	-	-	0,1	-	-	-	0,05	0,15	остальное
AlMn1Mg0,5	3005	0,6	0,7	0,3	1,0-1,5	0,2-0,6	0,1	0,25	0,1	-	-	0,05	0,15	остальное
AlMn1Mg1	3004	0,3	0,7	0,25	1,0-1,5	0,8-1,3	-	0,25	-	-	-	0,05	0,15	остальное

Таблица 19

**Химический состав алюминиевых деформируемых сплавов  
по стандарту DIN EN573-31:1994, Германия, %**

Номер сплава	Марка	Основные компоненты											Прочие элементы		Al, не менее
		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ga	V	Ti	в отдель- ности	в сумме	
Серия 3000 - сплавы системы Al-Mn															
EN AW 3002	ENAW-AlMn0,2Mg0,1	0,08	0,1	0,15	0,05-0,25	0,05-0,2	-	-	0,05	-	0,05	0,03	0,03	0,1	остальное
EN AW 3102	ENAW-AlMn0,2	0,4	0,7	0,1	0,05-0,4	-	-	-	0,3	-	-	0,1	0,05	0,15	остальное
EN AW 3003	ENAW-AlMn1Cu	0,6	0,7	0,05-0,2	1-1,5	-	-	-	0,1	-	-	-	0,05	0,15	остальное
EN AW 3103	ENAW-AlMn1	0,5	0,7	0,1	0,9-1,5	0,3	0,1	-	0,2	-	-	-	0,05	0,15	остальное
ENAW 3103A	ENAW-AlMn1(A)	0,5	0,7	0,1	0,7-1,4	0,3	0,1	-	0,2	-	-	0,1	0,05	0,15	остальное
EN AW 3004	ENAW-AlMn1Mg1	0,3	0,7	0,25	1-1,5	0,8-1,3	-	-	0,25	-	-	-	0,05	0,15	остальное
EN AW 3104	ENAW-AlMn1Mg1Cu	0,6	0,8	0,05-0,25	0,8-1,4	0,8-1,3	-	-	0,25	0,1	0,05	0,1	0,05	0,15	остальное
EN AW 3005	ENAW-AlMn1Mg0,5	0,6	0,7	0,3	1-1,5	0,2-0,6	0,1	-	0,25	-	-	0,1	0,05	0,15	остальное
EN AW 3105	ENAW-AlMn0,5Mg0,5	0,6	0,7	0,3	0,3-0,8	0,2-0,8	0,2	-	0,4	-	-	0,1	0,05	0,15	остальное
ENAW 3105A	ENAW-AlMn0,5Mg0,5(A)	0,6	0,7	0,3	0,3-0,8	0,2-0,8	0,2	-	0,25	-	-	0,1	0,05	0,15	остальное
EN AW 3207	ENAW-AlMn0,6	0,3	0,45	0,1	0,4-0,8	0,1	-	-	0,1	-	-	-	0,05	0,15	остальное
EN AW 3207A	ENAW-AlMn0,6(A)	0,35	0,6	0,25	0,3-0,8	0,4	0,2	-	-	-	0,25	-	0,05	0,15	остальное
EN AW 3017	ENAW-AlMn1Cu0,3	0,25	0,25-0,45	0,25-0,45	0,8-1,2	0,1	0,15	-	-	-	0,1	0,05	0,05	0,15	остальное

Промышленные сплавы этой системы содержат от 1,0 до 1,6 % Mn. Эти сплавы в действительности не являются двойными, поскольку примеси Fe и Si, неизбежные в алюминии, делают их многокомпонентными. Примеси (особенно кремния) уменьшают растворимость марганца в алюминии. При одновременном содержании Fe и Si в сплавах Al-Mn может образоваться фаза AlMnSiFe. Сплавы типа AlMn термообработкой не упрочняются. После нагрева на 640...650<sup>0</sup>C и быстрого охлаждения можно зафиксировать пересыщенный твердый раствор марганца в алюминии, который быстро распадается при последующих нагревах. Поэтому конечной термической обработкой сплавов Al-Mn является рекристаллизационный отжиг. Упрочнение сплавов достигается только за счет холодной или теплой пластической деформации. Следует иметь в виду, что марганец значительно повышает температуру начала рекристаллизации. Если технический Al имеет интервал рекристаллизации 200...220<sup>0</sup>C, то после введения в Al 1,3 % Mn этот интервал смещается и составляет от 400 до 450<sup>0</sup>C.

Марганец в алюминии имеет малую скорость диффузии, поэтому заготовки практически всегда характеризуются ярко выраженной внутридендритной ликвацией, которая не устраняется при нагреве и при горячей деформации. Неоднородность по составу усиливает неравномерность поля внутренних напряжений по объему заготовки, вследствие чего рекристаллизация начинается в небольшом числе центров, из которых зерна успевают вырасти до крупных размеров еще до начала рекристаллизации в других областях. Из-за этой осо-

бенности сплавов Al-Mn необходима гомогенизация при высоких температурах, порядка 600...620<sup>0</sup>С [34]. Эффективной мерой по измельчению рекристаллизованного зерна сплавов Al-Mn является его легирование титаном.

Кривые упрочнения при испытаниях на сжатие в холодном состоянии образцов, изготовленных из металла с различной технологической подготовкой, приведены на рис. 78 [11].

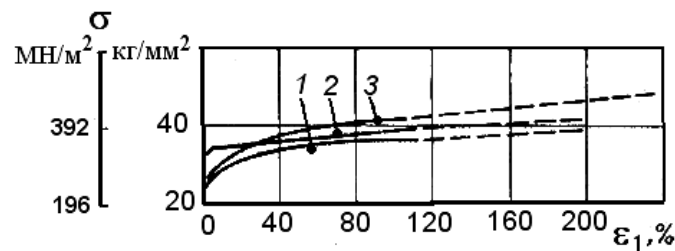


Рис. 78. Кривые упрочнения при сжатии алюминиевого сплава AlMn:  
1 – отожженного; 2 – горячештампованного; 3 – холоднотянутого  
со степенью обжатия 40 %

Из приведенных графиков следует, что степень пластической деформации более 40 % слабо влияет на величину  $\sigma_s$  при любых исходных состояниях металла. На графиках  $\varepsilon_1$  является логарифмической степенью деформации, выраженной в процентах:

$\varepsilon_1 = \ln \frac{h_0}{h_1}$ , где  $h_0$  и  $h_1$  – высота осаживаемой заготовки до и после деформации.

Характер степенного упрочнения при сравнительно малых степенях деформации, достигнутых в результате холодной прокатки заготовок, их которых изготовлены продольные образцы на растяжение, иллюстрируется кривой упрочнения на рис. 79, полученной авторами [25].



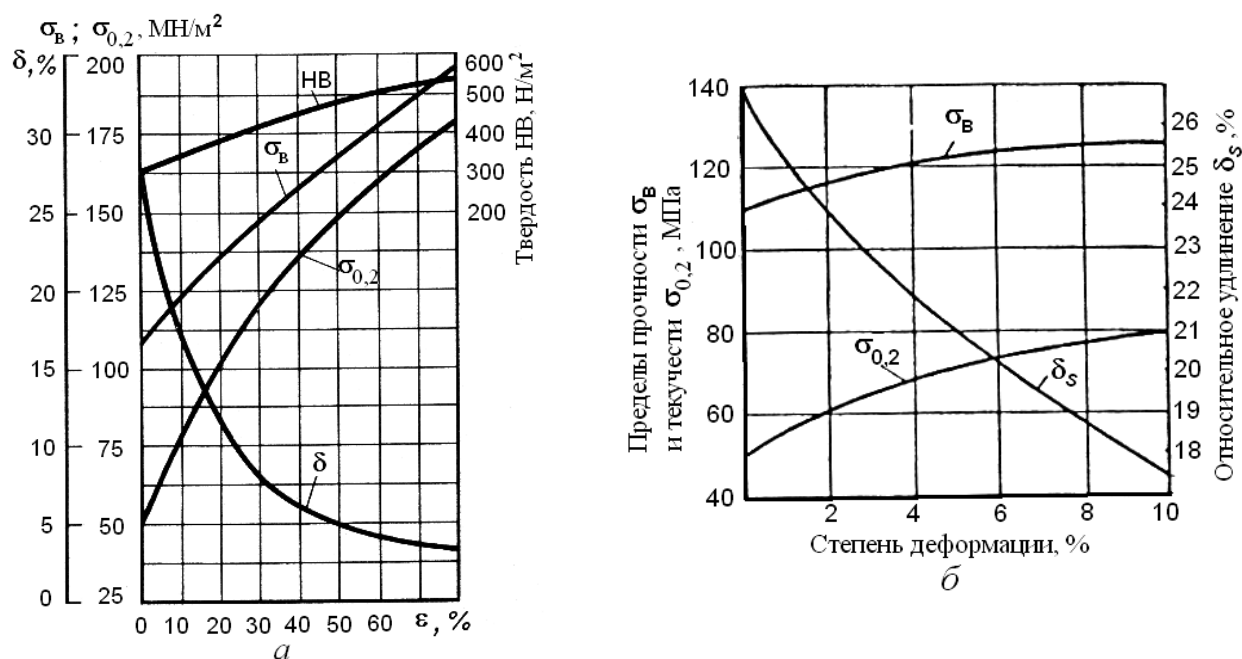


Рис. 79. Кривые упрочнения при холодной деформации алюминиевого сплава АМц (1,0...1,6 % Mn;  $\leq 0,4...0,6$  % Si; 0,5...0,7 % Fe; 0,2...0,5 % Cu; ост. Al) по данным [25] (а) и [47] (б)

Сопротивление горячей деформации сплава АМц для различных диапазонов скорости деформации определено пластометрическими исследованиями на осадку на кулачковом пластометре и графически представлено в книгах [10, 17] и на рис. 80, 81 и 82.

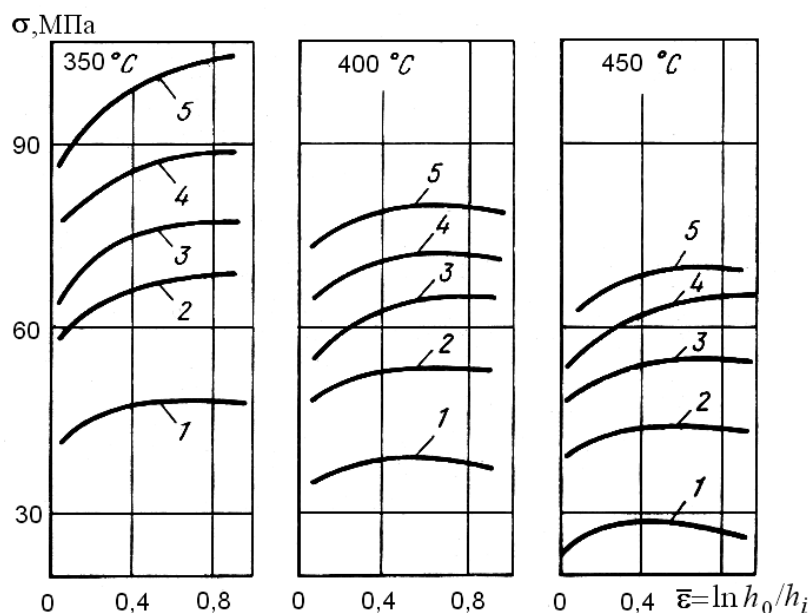


Рис. 80. Кривые деформационного упрочнения сплава типа АМц (1,3 % Mn) в горячепрессованном состоянии. Скорость деформации, с<sup>-1</sup>:  
1 – 0,01; 2 – 1; 3 – 10; 4 – 100; 5 – 200

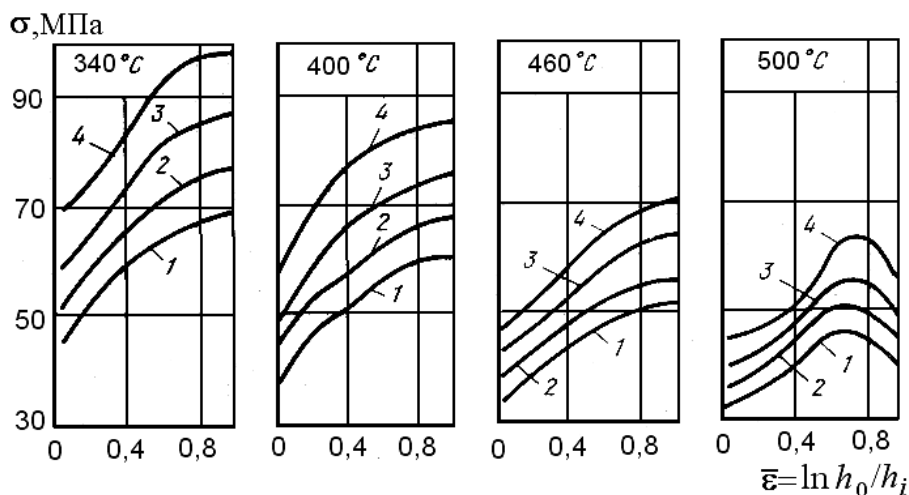


Рис. 81. Кривые деформационного упрочнения сплава типа АМц.  
Скорость деформации,  $\text{с}^{-1}$ : 1 – 0,5; 2 – 5; 3 – 20; 4 – 60

Изменение  $\sigma_s$  при горячей деформации в зависимости от степени деформации  $\varepsilon$  при осадке, температуры  $t$  и скорости деформации  $u$ , а также графики функций термомеханических коэффициентов показаны на рис. 83 по данным работы [25, 41].

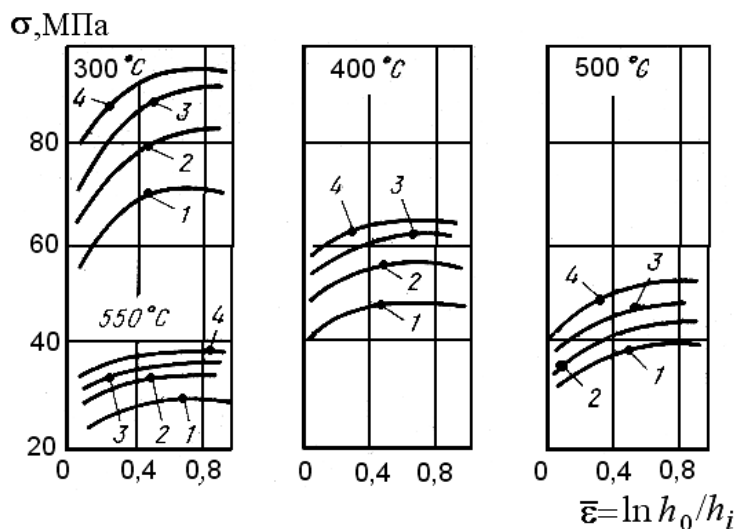


Рис. 82. Кривые деформационного упрочнения сплава АМц (1,36 % Mn; 0,30 % Si; 0,33 % Fe; 0,04 % Cu) после холодной прокатки и отжига. Скорость деформации,  $\text{с}^{-1}$ : 1 – 1; 2 – 10; 3 – 20; 4 – 30

Объемная диаграмма зависимости  $\sigma_s = \sigma_s(\varepsilon, t)$  сплава АМц, полученная для диапазона скоростей деформации при свободной ковке и горячей объемной штамповке на прессах, показана на рис. 84 [39].

О влиянии предварительной пластической деформации в горячем состоянии (ковка и прессование) на характер зависимостей  $\sigma_s$  от температуры и скорости деформации можно судить по графикам на

рис. 85 и 86, на которых представлены и достаточно надежные полиномиальные функции, описывающие приведенные кривые.

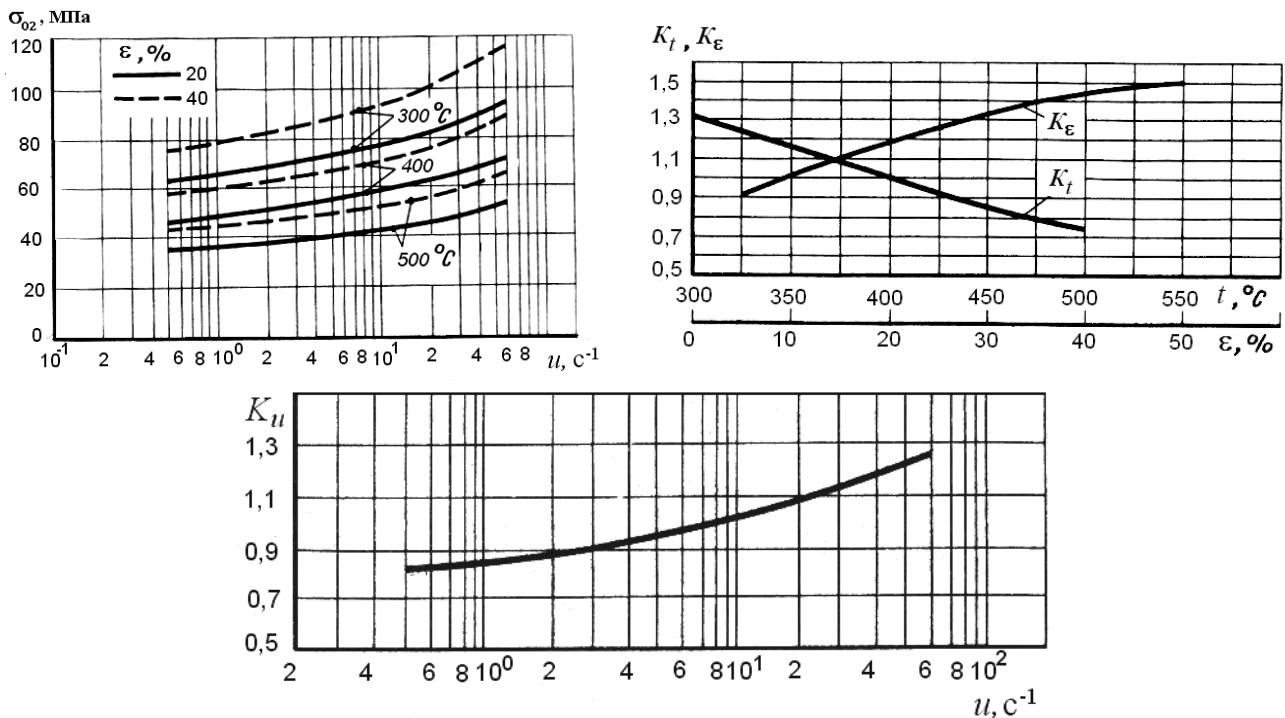


Рис. 83. Сопротивление деформации алюминиевого сплава АМц (1,0...1,6 % Mn;  $\leq 0,05$  % Mg;  $\leq 0,4...0,6$  % Si; 0,5...0,7 % Fe; 0,2...0,5 % Cu; ост. Al)

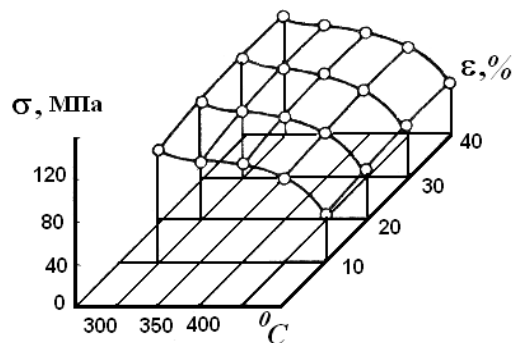


Рис. 84. Кривые течения алюминиевого сплава АМц

Поскольку в книге [13] нет сведений о величинах степеней деформации при испытании, объяснить снижение  $\sigma_s$  при  $\dot{\epsilon} > 10$  невозможно. Если степень деформации велика, то спад сопротивлений деформации возможен за счет ускорения рекристаллизационных процессов. Нельзя игнорировать и влияние деформационного разогрева, который при проведении опытов не учитывался.

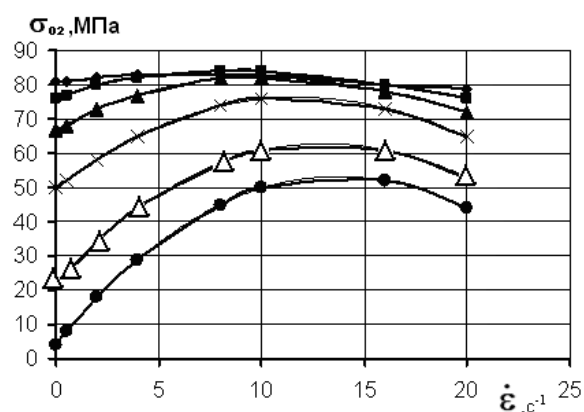


Рис. 85. Сопротивление деформации сплава АМц в литом состоянии при различных скоростях и температурах деформации [13]: ◆ – 50<sup>0</sup>С; ■ – 150<sup>0</sup>С; ▲ – 250<sup>0</sup>С; х – 350<sup>0</sup>С; Δ – 450<sup>0</sup>С; ● – 500<sup>0</sup>С.

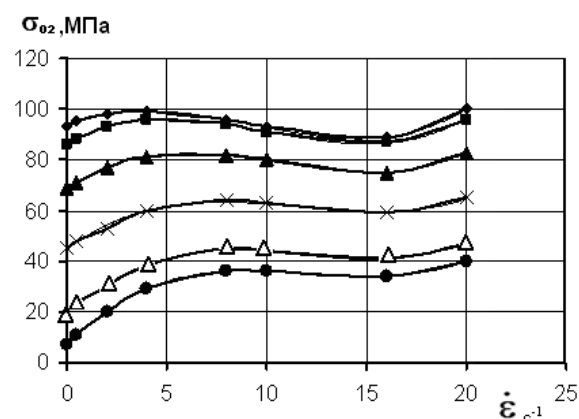


Рис. 86. Сопротивление деформации сплава АМц в деформированном состоянии при различных скоростях и температурах деформации [13]: ◆ – 50<sup>0</sup>С; ■ – 150<sup>0</sup>С; ▲ – 250<sup>0</sup>С; х – 350<sup>0</sup>С; Δ – 450<sup>0</sup>С; ● – 500<sup>0</sup>С.

## 5.4. Сплавы системы Al-Mg

Эти сплавы так же, как технический алюминий и сплавы Al-Mn, относятся к нетермоупрочняемым. Магний значительно упрочняет алюминий. Каждый процент Mg повышает  $\sigma_b$  сплава приблизительно на 25...30 МПа [34]. Сплавы могут рассматриваться как деформируемые до 11...12 % Mg. При содержании магния до 8% (по массе) сплавы не упрочняются термической обработкой. Однако при содержании магния более 6 % резко ухудшаются антикоррозионные свойства, поэтому такие сплавы Al-Mg не применяются.

В России сплавы системы Al-Mg выпускаются по ГОСТ 4784-97 с химическим составом, приведенным в табл. 20.

Таблица 20

Химический состав сплавов системы (Al-Mg) по ГОСТ 4784-97

Марка сплава	Цифровое обозначение	Al, не менее	Массовая доля элементов, %									Прочие примеси	
			Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Другие элементы	Каждая	Сумма
АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ СИСТЕМЫ АЛЮМИНИЙ-МАГНИЙ (Al-Mg)													
AMr0,5	1505	остальное	0,1	0,1	0,1	0,2	0,4-0,8	-	-	-	-	0,05	0,1
AMr1	1510	остальное	0,3	0,7	0,2	0,2	0,5-1,1	0,1	0,25	-	-	0,05	0,15
AMr1,5	-	остальное	0,4	0,7	0,2	0,1	1,1-1,8	0,1	0,25	-	-	0,05	0,15
AMr2	1520	остальное	0,4	0,5	0,15	0,1-0,5	1,7-2,4	0,05	0,15	0,15	-	0,05	0,15
AMr2,5	-	остальное	0,25	0,4	0,1	0,1	2,2-2,8	0,15-0,35	0,1	-	-	0,05	0,15
AMr3	1530	остальное	0,5-0,8	0,5	0,1	0,3-0,6	3,2-3,8	0,05	0,2	0,1	-	0,05	0,1
AMr3,5	-	остальное	0,25	0,4	0,1	0,1	3,1-3,9	0,15-0,35	0,2	0,2	Be 0,0008; Mn+Cr 0,1-0,5	0,05	0,15
AMr4,0	1540	остальное	0,4	0,5	0,1	0,2-0,7	3,5-4,5	0,05-0,25	0,25	0,15	-	0,05	0,15
AMr4,5	-	остальное	0,4	0,4	0,1	0,4-1	4-4,9	0,05-0,25	0,25	0,15	-	0,05	0,15
AMr5	1550	остальное	0,5	0,5	0,1	0,3-0,8	4,8-5,8	-	0,2	0,02-0,1	Be 0,0002-0,005	0,05	0,1
AMr6	1560	остальное	0,4	0,4	0,1	0,5-0,8	5,8-6,8	-	0,2	0,02-0,1	Be 0,0002-0,005	0,05	0,1

Химический состав сплавов Al-Mg по стандарту ISO209-1:1089E приведен в табл. 21, а по стандарту JIS Япония – в табл. 22, по стандарту DIN EN573-31:1994, Германия – в табл. 23.

Таблица 21

Химический состав деформируемых сплавов системы (Al-Mg)  
по стандарту ISO209-1:1989E

Марка сплава	Номер**	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Zr	Примечания	Прочие		Al
												Каждый	Всего	
Al-Mg (Серия 5000)														
AlMgSMn1	5456	0,25	0,4	0,1	0,5-1	4,7-5,5	0,05-0,2	0,25	0,2	-	-	0,05	0,15	остальное
AlMgScr	5056	0,3	0,4	0,1	0,05-0,2	4,5-5,6	0,05-0,2	0,1	-	-	Be 0,0008	0,05	0,15	остальное
AlMgScr(A)	5356	0,25	0,4	0,1	0,05-0,2	4,5-5,5	0,05-0,2	0,1	0,06-0,2	-	Be 0,0008	0,05	0,15	остальное
AlMg1(B)	5005	0,3	0,7	0,2	0,2	0,5-1,1	0,1	0,25	-	-	-	0,05	0,15	-''-
AlMg1,5(C)	5050	0,4	0,7	0,2	0,1	1,1-1,8	0,1	0,25	-	-	-	0,05	0,15	-''-
AlMg2	5251	0,4	0,5	0,15	0,1-0,5	1,7-2,4	0,15	0,15	0,15	-	-	0,05	0,15	-''-
AlMg2,5	5052	0,25	0,4	0,1	0,1	2,2-2,8	0,15-0,35	0,1	-	-	-	0,05	0,15	-''-
AlMg3	5754	0,4	0,4	0,1	0,5	2,6-3,6	0,3	0,2	0,15	-	Mn+Cr 0,1-0,6	0,05	0,15	-''-
AlMg3Mn	5454	0,25	0,4	0,1	0,5	2,4-3	0,05-0,2	0,25	0,2	-	Be 0,0008****	0,05	0,15	-''-
AlMg3Mn(A)	5554	0,25	0,4	0,1	0,5-1	2,4-3	0,05-0,2	0,25	0,05-0,2	-	Be 0,0008****	0,05	0,15	-''-
AlMg3,5	5154	0,25	0,4	0,1	0,1	3,1-3,9	0,15-0,35	0,2	0,2	-	Be 0,0008****	0,05	0,15	-''-
AlMg3,5(A)	5154A	0,5	0,5	0,1	0,5	3,1-3,9	0,25	0,2	2	-	Mn+Cr 0,1-0,5	0,05	0,15	-''-
AlMg4	5086	0,4	0,5	0,1	0,2-0,7	3,5-4,5	0,05-0,25	0,25	0,15	-	Mn+Cr 0,1-0,5	0,05	0,15	-''-
AlMg4,5Mn0,7(A)	5183	0,4	0,4	0,1	0,5-1	4,3-5,2	0,05-0,25	0,25	0,15	-	Be 0,0008	0,05	0,15	-''-
AlMg4,5Mn0,7	5083	0,4	0,4	0,1	0,4-1	4-4,9	0,05-0,25	0,25	0,15	-	Be 0,0008	0,05	0,15	-''-
AlMgS	5056A	0,4	0,5	0,1	0,1-0,6	4,5-5,6	0,2	0,2	0,2	-	Cr+Mn 0,1-0,6	0,05	0,15	-''-

Таблица 22

Химический состав алюминия и алюминиевых деформируемых сплавов по стандартам JIS, Япония, %

Номер сплава	Легирующие компоненты и примеси									Прочие примеси		Al
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Zr, Zr+Ti, V	Ti	в отдельности	в сумме	
5005	0,3	0,7	0,2	0,2	0,5-1,1	0,1	0,25	-	-	0,05	0,15	остальное
5052	0,25	0,4	0,1	0,1	2,2-2,8	0,15-0,35	0,1	-	-	0,05	0,15	остальное
5652	Si+Fe 0,4		0,04	0,01	2,2-2,8	0,15-0,35	0,1	-	-	0,05	0,15	остальное
5154	Si+Fe 0,45		0,1	0,1	3,1-3,9	0,15-0,35	0,2	-	0,2	0,05	0,15	остальное
5254	Si+Fe 0,45		0,05	0,01	3,1-3,9	0,15-0,35	0,2	-	0,05	0,05	0,15	остальное
5454	0,25	0,4	0,1	0,5-1	2,4-3	0,05-0,2	0,25	-	20	0,05	0,15	остальное
5056	0,3	0,4	0,1	0,05-0,2	4,5-5,6	0,05-0,2	0,1	-	-	0,05	0,15	остальное
5082	0,2	0,35	0,15	0,15	4-5	0,15	0,25	-	0,1	0,05	0,15	остальное
5182	0,2	0,35	0,15	0,2-0,5	4-5	0,15	0,25	-	0,1	0,05	0,15	остальное
5083	0,4	0,4	0,1	0,4-1	4-4,9	0,05-0,25	0,25	-	0,15	0,05	0,15	остальное
5086	0,4	0,5	0,1	0,2-0,7	1,5-4,5	0,05-0,25	0,25	-	0,15	0,05	0,15	остальное
5N01	0,15	0,25	0,2	0,2	0,2-0,6	-	0,03	-	-	0,05	0,1	остальное

Легирование сплавов системы (Al-Mg) хромом, титаном и ванадием способствует равномерному выделению  $\beta$ -фазы и уменьшает их склонность к коррозии под напряжением. Небольшие добавки (0,5...0,6 %) Si улучшают свариваемость сплавов типа АМг, которые в последние годы все шире используются для изготовления сварных конструкций [34].



Таблица 23

Химический состав деформируемых сплавов системы (Al-Mg)  
по стандарту DIN EN573-31:1994, Германия

Номер сплава	Марка	Основные компоненты									Прочие элементы		Al, не менее		
		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	в отдель- ности	в сумме			
Серия 5000 - сплавы системы Al-Mg															
EN AW 5005	EN AW-AlMg1(B)	0,3	0,7	0,2	0,2	0,5-1,1	0,1	-	0,25	-	0,05	0,15	остальное		
ENAW5005A	EN AW-AlMg1(C)	3	0,45	0,05	0,15	0,7-1,1	0,1	-	0,2	-	0,05	0,15	остальное		
EN AW 5305	ENAW-Al99,85Mg1	0,08	0,08	-	0,03	0,7-1,1	-	-	0,05	0,02	0,02	-	остальное		
EN AW 5505	ENAW-Al99,9Mg1	0,06	0,04	-	0,03	0,8-1,1	-	-	0,04	0,01	0,01	-	остальное		
EN AW 5605	ENAW-Al99,98Mg1	0,01	0,008	-	-	0,8-1,1	-	-	0,01	0,01	0,003	-	остальное		
EN AW 5010	ENAW-AlMg0,5Mn	0,4	0,7	0,25	0,1-0,3	0,2-0,6	0,15	-	0,3	0,1	0,05	0,15	остальное		
EN AW 5110	ENAW-Al99,85Mg0,5	0,08	0,08	-	0,03	0,3-0,6	-	-	0,05	0,02	0,02	-	остальное		
EN AW 5210	ENAW-Al99,9Mg0,5	0,06	0,04	-	0,03	0,35-0,6	-	-	0,04	0,01	0,01	-	остальное		
Номер сплава	Марка	Основные компоненты									Прочие элементы		Al, не менее		
		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	V	Ti	в отдель- ности		в сумме	
Серия 5000 - сплавы системы Al-Mg															
EN AW 5310	ENAW-Al99,98Mg0,5	0,01	0,008	-	-	0,35-0,6	-	-	0,01	-	0,008	0,003	-	остальное	
EN AW 5018	ENAW-AlMg3Mn0,4	0,25	0,4	0,05	0,2-0,6	2,6-3,6	0,3	-	0,2	-	0,15	0,05	0,15	остальное	
EN AW 5019	EN AW-AlMg5	0,4	0,5	0,1	0,1-0,6	4,5-5,6	0,2	-	0,2	-	0,2	0,05	0,15	остальное	
EN AW 5119	EN AW-AlMg5(A)	0,25	0,4	0,05	0,2-0,6	4,5-5,6	0,3	-	0,2	-	0,15	0,05	0,15	остальное	
EN AW 5040	ENAW-AlMg1,5Mn	0,3	0,7	0,25	0,9-1,4	1-1,5	0,1-0,3	-	0,25	-	-	0,05	0,15	остальное	
EN AW 5042	ENAW-AlMg3,5Mn	0,2	0,35	0,15	0,2-0,5	3-4	0,1	-	0,25	-	-	0,05	0,15	остальное	
EN AW 5049	ENAW-AlMg2Mn0,8	0,4	0,5	0,1	0,5-1,1	1,6-2,5	0,3	-	0,2	-	0,1	0,05	0,15	остальное	
EN AW 5149	ENAW-AlMg2Mn0,8(A)	0,25	0,4	0,05	0,5-1,1	1,6-2,5	0,3	-	0,2	-	0,15	0,05	0,15	остальное	
EN AW 5249	ENAW-AlMg2Mn0,8Zr	0,25	0,4	0,05	0,5-1,1	1,6-2,5	0,3	-	0,2	-	0,15	0,05	0,15	остальное	
EN AW 5050	ENAW-AlMg1,5(C)	0,4	0,7	0,2	0,1	1,1-1,8	0,1	-	0,25	-	-	0,05	0,1	остальное	
ENAW5050A	ENAW-AlMg1,5(D)	0,4	0,7	0,2	0,3	1,1-1,8	0,1	-	0,25	-	-	0,05	0,15	остальное	
EN AW 5051A	EN AW-AlMg2(B)	0,3	0,45	0,05	0,25	1,4-2,1	0,3	-	0,2	-	0,1	0,05	0,15	остальное	
EN AW 5251	EN AW-AlMg2	0,4	0,5	0,15	0,1-0,5	1,7-2,4	0,15	-	0,15	-	0,15	0,05	0,15	остальное	
EN AW 5052	ENAW-AlMg2,5	0,25	0,4	0,1	0,1	2,2-2,8	0,15-0,35	-	0,1	-	-	0,05	0,15	остальное	
EN AW 5252	ENAW-AlMg2,5(B)	0,08	0,1	0,1	0,1	2,2-2,8	-	-	0,05	0,05	-	0,03	0,1	остальное	
EN AW 5352	ENAW-AlMg2,5(A)	Si + Fe 0,45	0,1	0,1	0,1	2,2-2,8	0,1	-	0,1	-	0,1	0,05	0,15	остальное	
ENAW5154A	ENAW-AlMg3,5(A)	0,5	0,5	0,1	0,5	3,1-3,9	0,25	-	0,2	-	0,2	0,05	0,15	остальное	
ENAW5154B	ENAW-AlMg3,5Mn0,3	0,35	0,45	0,05	0,15-0,45	3,2-3,8	0,1	0,01	0,15	-	0,15	0,05	0,15	остальное	
EN AW 5354	ENAW-AlMg2,5MnZr	0,25	0,4	0,05	0,5-1	2,4-3	0,05-0,2	-	0,25	-	0,15	0,05	0,15	остальное	
EN AW 5454	ENAW-AlMg3Mn	0,25	0,4	0,1	0,5-1	2,4-3	0,05-0,2	-	0,25	-	0,2	0,05	0,15	остальное	
EN AW 5554	ENAW-AlMg3Mn(A)	0,25	0,4	0,1	0,5-1	2,4-3	0,05-0,2	-	0,25	-	0,05-0,2	0,05	0,15	остальное	
EN AW 5654	EN AW-AlMg3,5Cr	Si + Fe 0,45	0,05	0,01	3,1-3,9	0,15-0,35	-	0,2	-	0,05-0,15	0,05	0,15	остальное		
EN AW 5754	EN AW-AlMg3	0,4	0,4	0,1	0,5	2,6-3,6	0,3	-	0,2	-	0,15	0,05	0,15	остальное	
EN AW 5056A	EN AW-AlMg5	Сплав аналогичный сплаву EN AW-5019													
Номер сплава	Марка	Основные компоненты									Прочие элементы		Al, не менее		
		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ga	V	Ti		в отдель- ности	в сумме
Серия 5000 - сплавы системы Al-Mg															
EN AW 5356	ENAW-AlMg5Cr(A)	0,25	0,4	0,1	0,05-0,2	4,5-5,5	0,05-0,2	-	0,1	-	-	0,06-0,2	0,05	0,15	остальное
EN AW 5456A	EN AW-AlMg5Mn1(A)	0,25	0,4	0,05	0,7-1,1	4,5-5,2	0,05-0,25	-	0,25	-	-	0,15	0,05	0,15	остальное
EN AW 5556A	EN AW-AlMg5Mn	0,25	0,4	0,1	0,6-1	5,0-5,5	0,05-0,2	-	0,2	-	-	0,05-0,2	0,05	0,15	остальное
EN AW 5657	ENAW-Al99,85Mg(A)	0,08	0,1	0,1	0,03	0,6-1	-	-	0,05	0,03	0,03	-	0,02	0,05	остальное
EN AW 5058	ENAW-AlMg5Pb1,5	0,4	0,5	0,1	0,2	4,5-5,6	0,1	-	0,2	-	-	0,2	0,05	0,15	остальное
EN AW 5082	EN AW-AlMg4,5	0,2	0,35	0,15	0,15	4-5	15	-	0,25	-	-	0,1	0,05	0,15	остальное
EN AW 5083	ENAW-AlMg4,5Mn0,7	0,4	0,4	0,1	0,4-1	4-4,9	0,05-0,25	-	0,25	-	-	0,15	0,05	0,15	остальное
EN AW 5182	EN AW-AlMg4,5Mn0,4	0,2	0,35	0,15	0,2-0,5	4-5	0,1	-	0,25	-	-	0,1	0,05	0,15	остальное
EN AW 5183	ENAW-AlMg4,5Mn0,7(A)	0,4	0,4	0,1	0,5-1	4,3-5,2	0,05-0,25	-	0,25	-	-	0,15	0,05	0,15	остальное
EN AW 5283A	ENAW-AlMg4,5Mn0,7(B)	0,3	0,3	0,03	0,5-1	4,5-5,1	0,05	0,03	0,1	-	-	0,03	0,05	0,15	остальное
EN AW 5086	EN AW-AlMg4	0,4	0,5	0,1	0,2-0,7	3,5-4,5	0,05-0,25	-	0,25	-	-	0,15	0,05	0,15	остальное
EN AW 5087	ENAW-AlMg4,5MnZr	0,25	0,4	0,05	0,7-1,1	4,5-5,2	0,05-0,25	-	0,25	-	-	0,15	0,05	0,15	остальное

Примеси натрия порождают эффект горячеломкости. Натрий может переходить в металл при плавке из креолит содержащих флю-

сов. При кристаллизации натрия оттесняется растущими ветвями дендритов алюминия в межкристаллитное пространство. На границах зерен возникают прослойки из чистого натрия с низкой температурой плавления ( $96^{\circ}\text{C}$ ). Поэтому в сплавах системы (Al-Mg) содержание натрия регламентируется ( $\leq 0,0006\%$ ). Коррозионная стойкость и свариваемость сплавов типа АМг ухудшаются от примесей железа и меди (допускается  $0,05 \dots 0,10\%$ ).

В последние годы разрабатывается новая группа сплавов системы (Al-Mg) с добавками скандия; даже при малом содержании скандий повышает прочность сплавов. Упрочнение Al-Mg сплавов от добавки скандия является суммарным эффектом дисперсионного твердения и структурного упрочнения. В качестве конкретного примера сплава Al-Mg-Sc может рассматриваться сплав 01570, содержащий  $6\%$  Mg и  $0,15 \dots 0,30\%$  Sc, а также модифицирующие добавки Mn и Zr.

Сопоставление механических свойств отоженных при  $320^{\circ}\text{C}$  листов сплавов 01570 и АМг6 [34] показывает значительное упрочнение сплава за счет введения скандия:

Сплав	$\sigma_{\text{в}}$ , МПа	$\sigma_{02}$ , МПа	$\delta$ , %
01570	400...420	300...320	14...18
АМг6	340...360	160...170	18...20

Стоит отметить, что сплав 01570 по коррозионной стойкости и свариваемости не уступает стандартному сплаву АМг6. Прессованные профили из сплава 01570 имеют примерно тот же уровень механических свойств, что и горячекатаные листы. Поковки и штамповки имеют несколько пониженный уровень механических характеристик. Из термически неупрочняемых сплавов алюминия 01570 в настоящее время является самым прочным.

Кривая деформационного упрочнения сплавов АМг1, АМг2, АМг3 и АМг6 с указанием химического состава представлена в справочниках [25 и 46] (рис. 87). Значение  $\sigma_{02}$  определялось растяжением образцов, вырезанных из деформированных холодной прокаткой листов вдоль направления прокатки. Степень деформации при прокатке оценивалась величиной  $\varepsilon = \Delta h/h_0$ , где  $\Delta h$  – абсолютное обжатие.

Кривые упрочнения при холодной деформации сплавов системы (Al-Mg) при различном исходном состоянии металла и при различных методах пластометрических испытаний представлены на рис. 88, 89 и 90 [11].



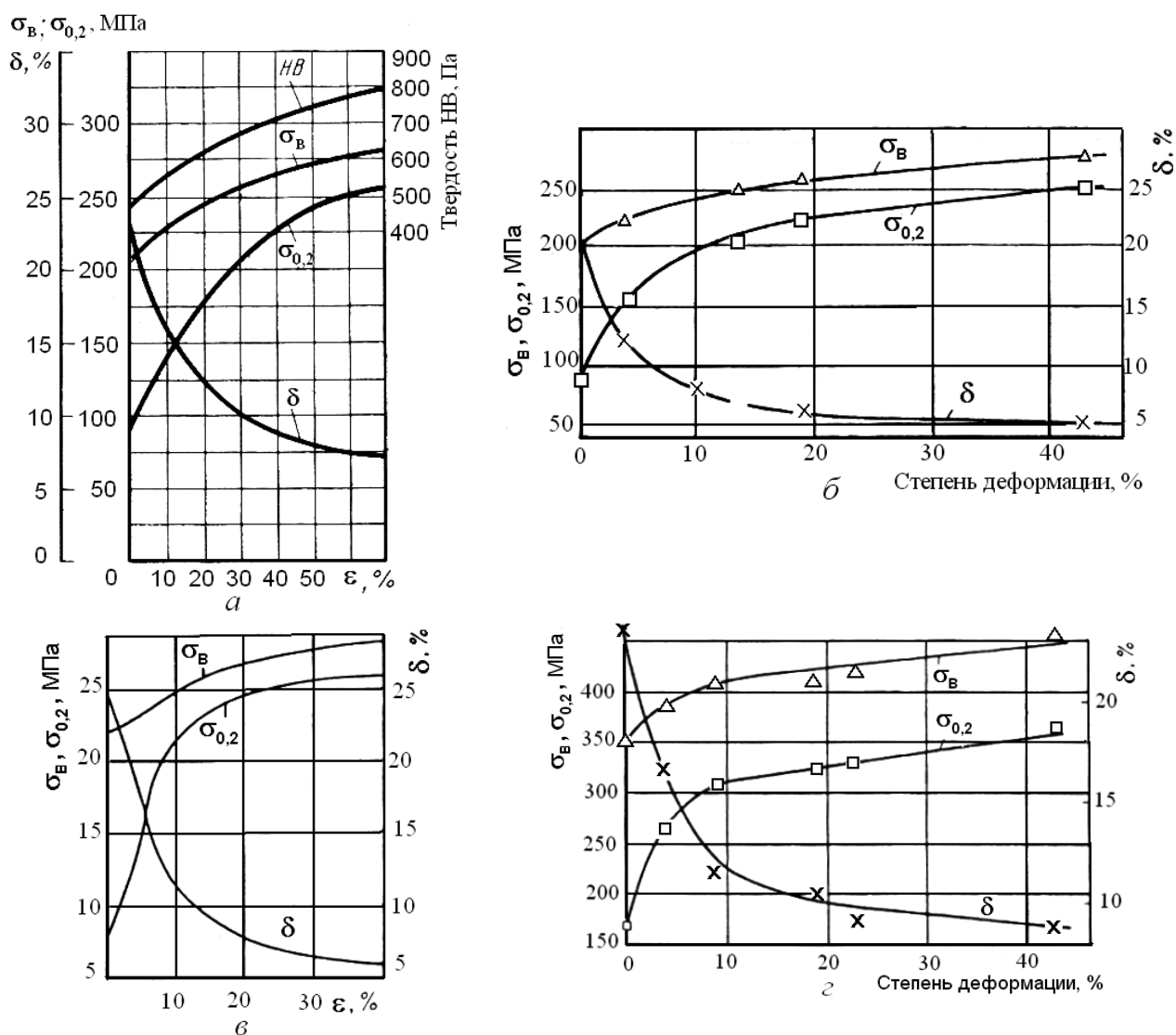


Рис. 87. Алюминиевые сплавы АМГ1 (а)  
(0,5...1,8 % Mg; <0,4...0,8 % Si; <0,5...0,7 % Fe; 0,2...0,5 % Cu; ост. Al);  
АМГ2 (б); АМГ3 (в); АМГ6 (г)

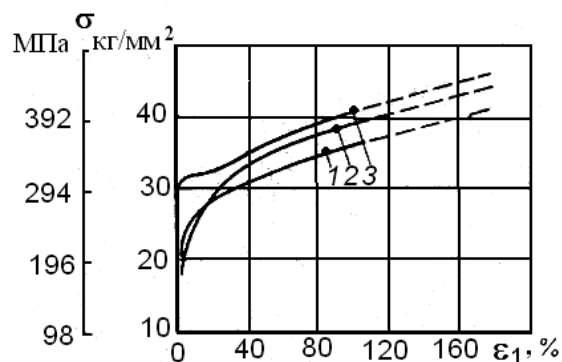


Рис. 88. Кривые упрочнения при сжатии алюминиевого сплава AlMg3:  
1 – отожженного; 2 – горячештампованного;  
3 – холоднотянутого со степенью обжатия 40 %



Сопротивление деформации в условиях горячей обработки сплава АМг1, представленное графически в работах [10, 17 и 25], исследовано на кулачковых пластометрах при различных температурах, степенях и скоростях деформации. Кривые упрочнения показаны на рис. 91 и 92.

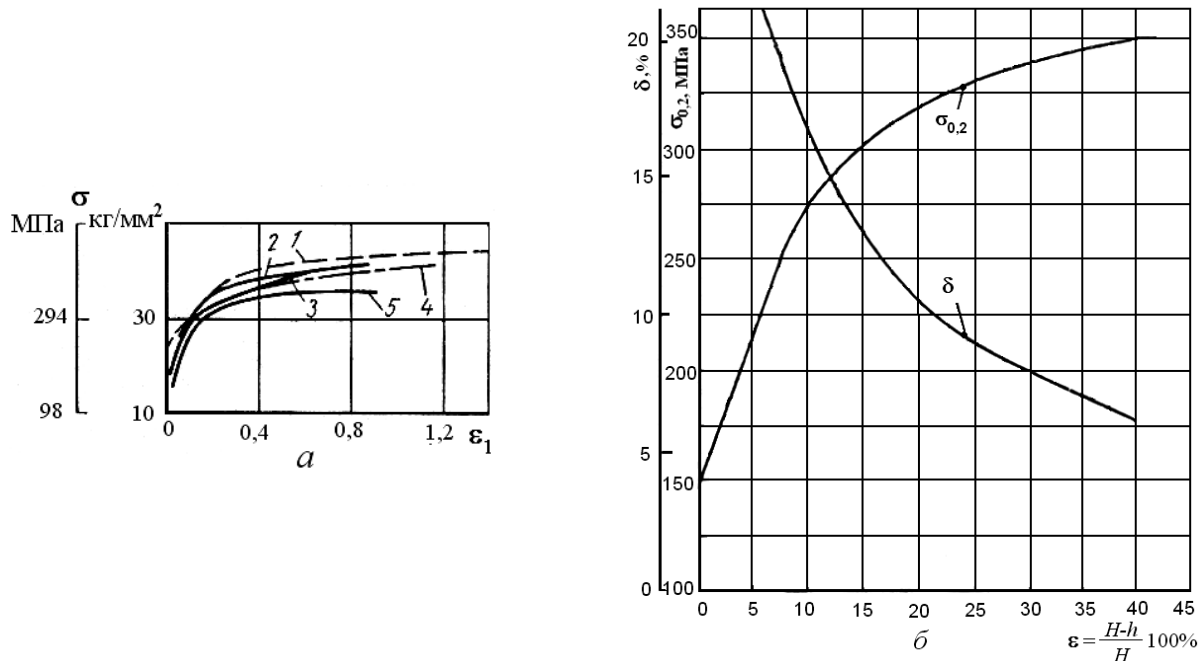


Рис. 89. Кривые упрочнения алюминиевого сплава AlMg5 (а) [11] при растяжении, сжатии и кручении (1 – осадка образцов с торцовыми коническими выточками; 2 – кручение, расчет произведен по приближенной формуле; 3 – растяжение; 4 – растяжение, расчет произведен по методу Reihle; 5 – кручение, расчет произведен по точной формуле) и сплава АМг5В (б) [44] при растяжении

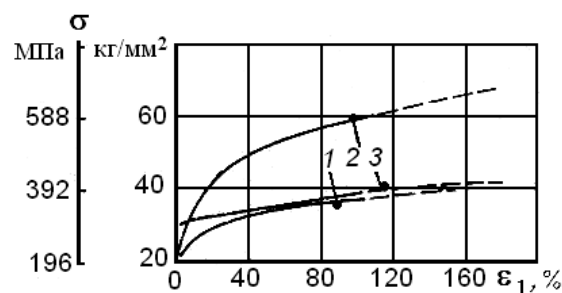


Рис. 90. Кривые упрочнения при сжатии алюминиевого сплава AlMg7: 1 – отожженного; 2 – горячештампованного; 3 – холоднотянутого со степенью обжата 40 %

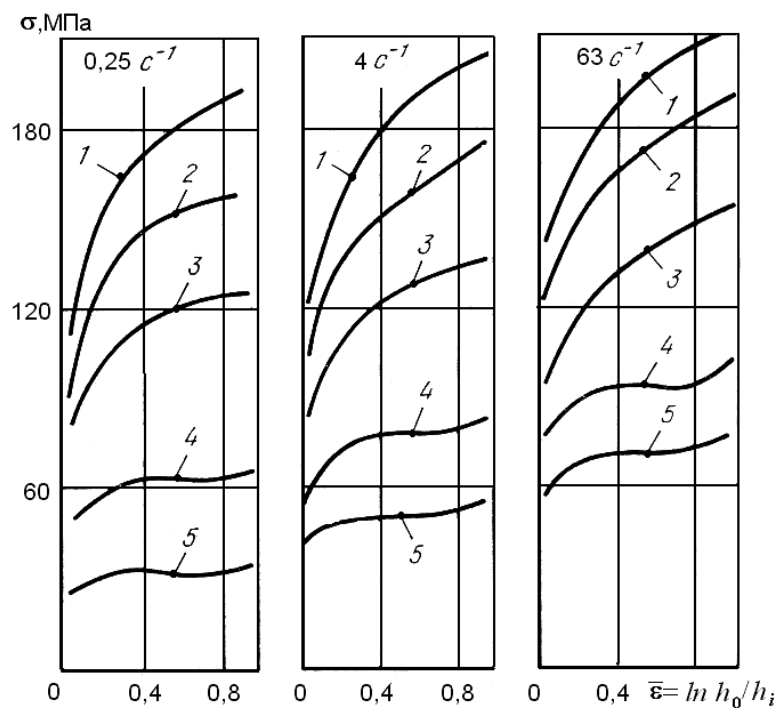


Рис. 91. Кривые деформационного упрочнения сплава АМг (0,9 % Mg; 0,11 % Si; 0,27 % Fe; 0,14 % Cr) после деформации и отжига. Температура,  $^{\circ}\text{C}$ : 1 – 20; 2 – 120; 3 – 240; 4 – 360; 5 – 480

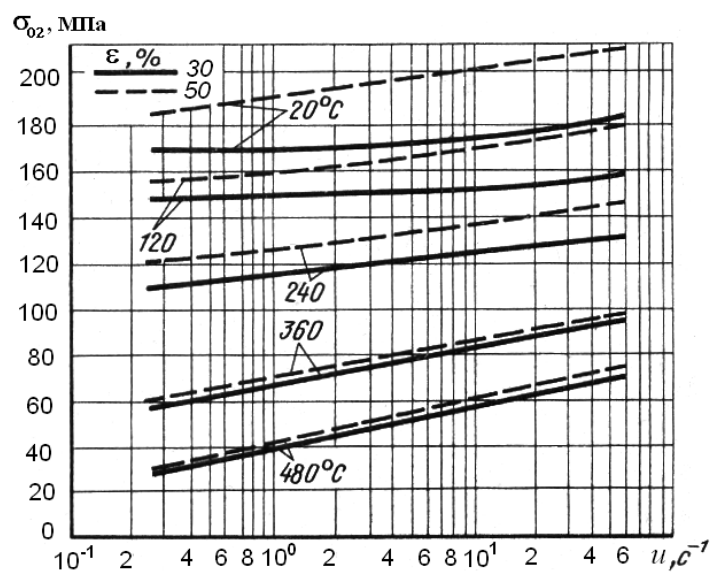


Рис. 92. Сопротивление деформации сплава АМг (0,9 % Mg; 0,11 % Si; 0,27 % Fe; 0,14 % Cr; ост. Al)

Зависимости  $\sigma_{02}$  от температуры  $t$  и скорости деформации  $\dot{\epsilon}$  без учета степени деформации, полученные автором [13] при растяжении образцов на кулачковом пластометре, приведены для сплава АМг1 (без указания химического состава) в литом и предварительно деформированном состоянии на рис. 93 и 94. К сожалению, в работе [13] нет указания о способе предварительного деформирования заго-

товок и ориентации образцов при их вырезке из литых и деформированных заготовок. Поскольку сплавы Al-Mg склонны к формированию дендритной структуры слитка при кристаллизации, от зоны слитка и направленности оси образца по отношению к осям дендритов существенно зависят механические характеристики сплава. При деформации, особенно интенсивной, формируется текстура деформации, определяющая анизотропию механических свойств. Если получена «острая» текстура деформации, то она трансформируется в текстуру рекристаллизации, во многом наследующую анизотропию практически всех механических характеристик, и в том числе сопротивления деформации сплава. Поэтому кривые на рис. 93 и 94 недостаточно информативны.

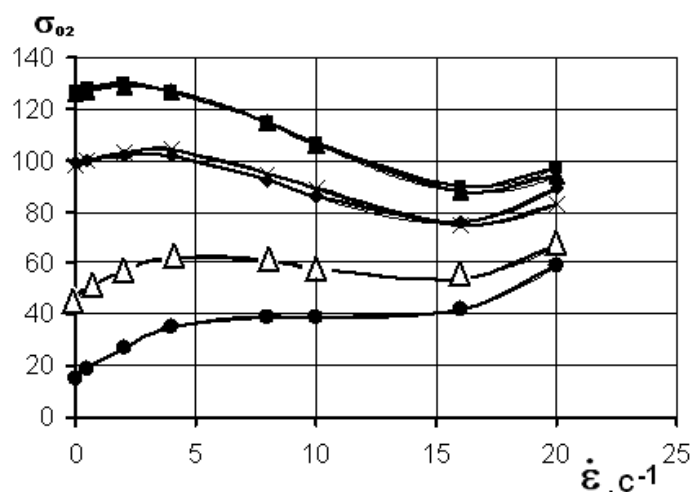


Рис. 93. Сопротивление деформации сплава АМг1 в литом состоянии при различных скоростях и температурах деформации: ◆ – 50<sup>0</sup>С; ■ – 150<sup>0</sup>С; ▲ – 250<sup>0</sup>С; х – 350<sup>0</sup>С; Δ – 450<sup>0</sup>С; ● – 500<sup>0</sup>С

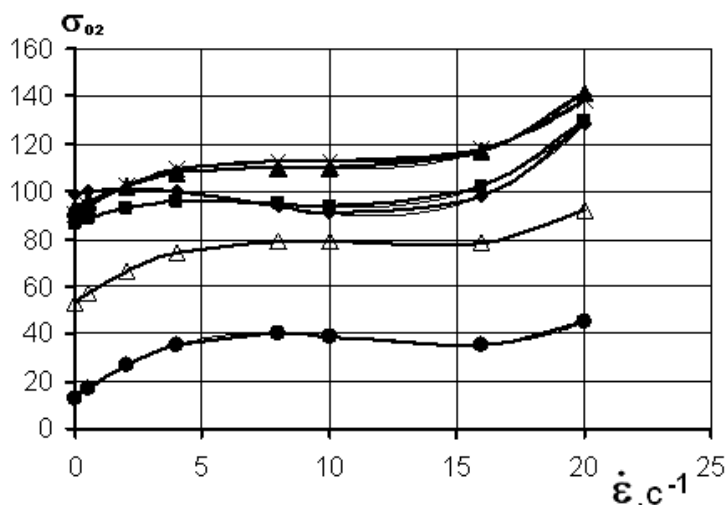


Рис. 94. Сопротивление деформации сплава АМг1 в деформированном состоянии при различных скоростях и температурах деформации: ◆ – 50<sup>0</sup>С; ■ – 150<sup>0</sup>С; ▲ – 250<sup>0</sup>С; х – 350<sup>0</sup>С; Δ – 450<sup>0</sup>С; ● – 500<sup>0</sup>С

Кривые упрочнения при горячей деформации сплава АМг2, полученные при пластометрических испытаниях на сжатие на образцах, вырезанных из заготовок в различном исходном состоянии, показаны на рис. 95 и 96 [10, 17].

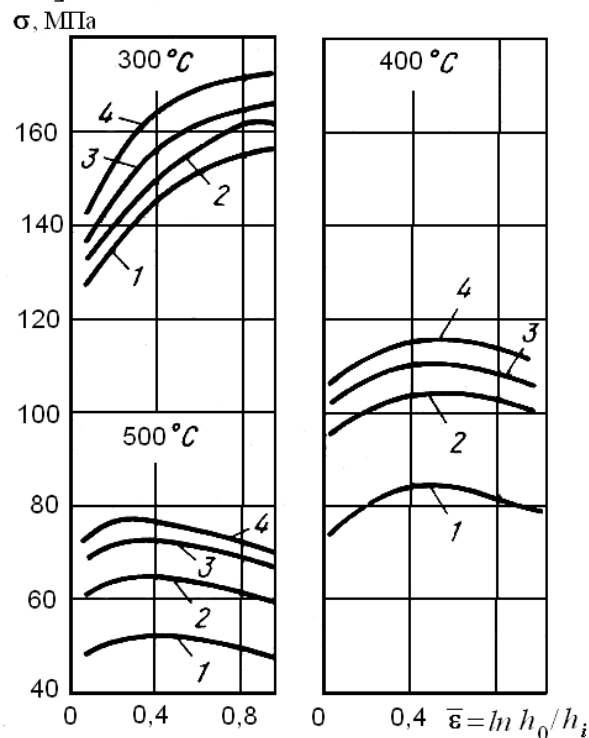


Рис. 95. Кривые деформационного упрочнения сплава АМг2 (0,06 % Cu; 0,17 % Mn; 2,35 % Mg; 0,22 % Si; 0,32 % Fe) после холодной прокатки. Скорость деформации,  $\text{с}^{-1}$ : 1–1; 2–10; 3–20; 4–30

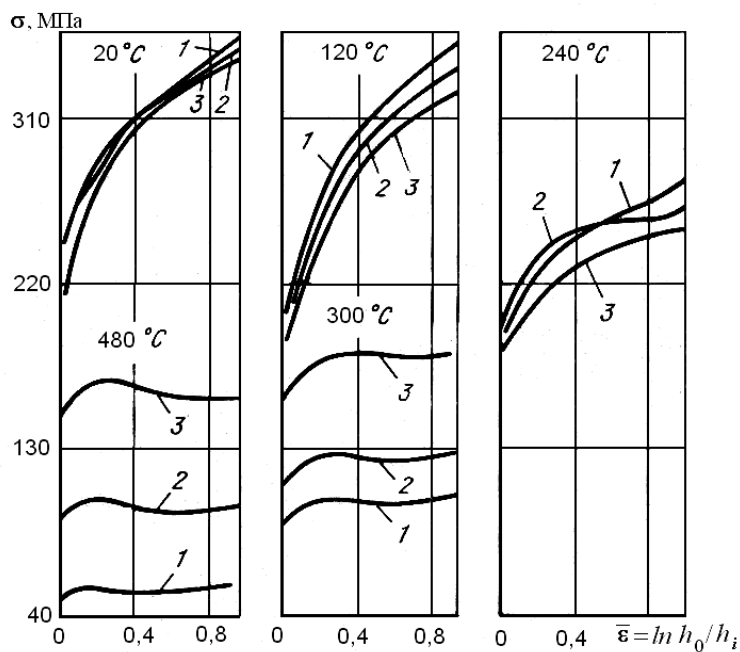


Рис. 96. Кривые испытаний на сжатие сплава АМг2 (0,065 % Cu; 0,81 % Mn; 2,45 % Mg; 0,12 % Si; 0,18 % Fe) после деформации и отжига. Скорость деформации,  $\text{с}^{-1}$ : 1 – 0,25; 2 – 4; 3 – 63

Кривые скоростного упрочнения для сплава АМг2, построенные и аппроксимированные по опытным данным работы [13], приведены на рис.97 и 98, а для сплава АМг3 в литом и деформированном состояниях – на рис. 99 и 100.

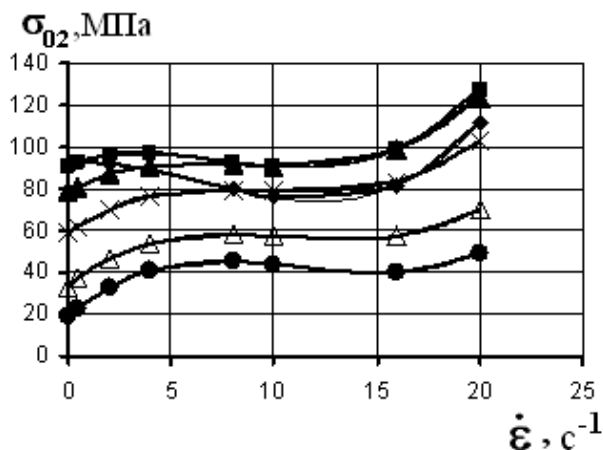


Рис. 97. Сопротивление деформации сплава АМг2 в литом состоянии при различных скоростях и температурах деформации: ♦ – 50°C; ■ – 150°C; ▲ – 250°C; х – 350°C; Δ – 450°C; • – 500°C

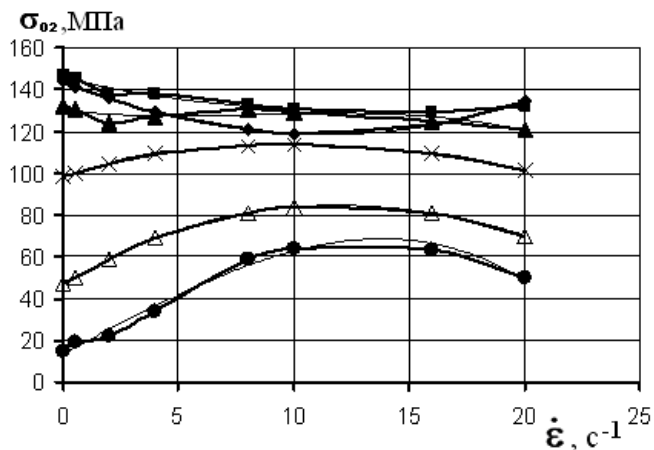


Рис. 98. Сопротивление деформации сплава АМг2 в деформированном состоянии при различных скоростях и температурах деформации: ♦ – 50°C; ■ – 150°C; ▲ – 250°C; х – 350°C; Δ – 450°C; • – 500°C

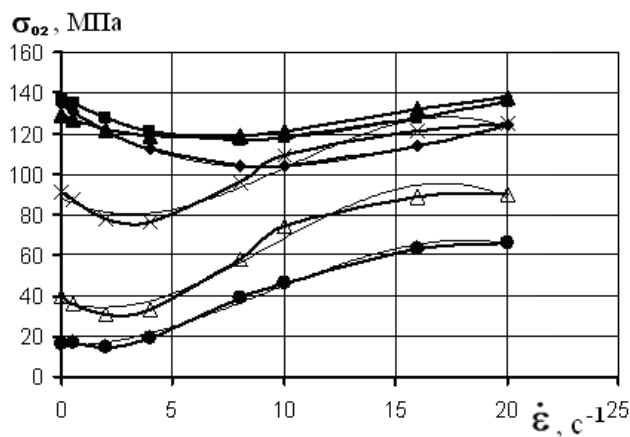


Рис. 99. Сопротивление деформации сплава АМг3 в литом состоянии при различных скоростях и температурах деформации: ♦ – 50°C; ■ – 150°C; ▲ – 250°C; х – 350°C; Δ – 450°C; • – 500°C

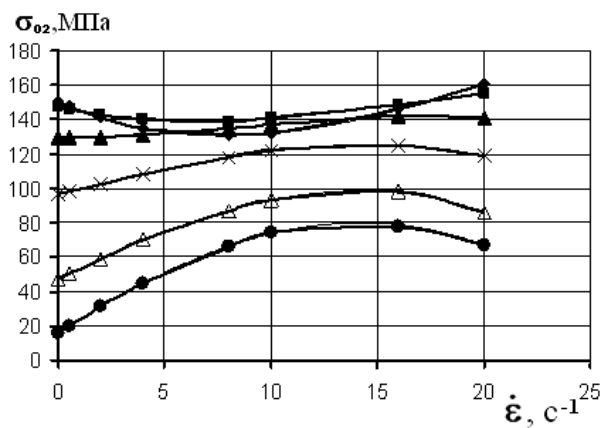


Рис. 100. Сопротивление деформации сплава АМг3 в деформированном состоянии при различных скоростях и температурах деформации: ♦ – 50°C; ■ – 150°C; ▲ – 250°C; х – 350°C; Δ – 450°C; • – 500°C

Зависимости  $\sigma_s = \sigma_s(\epsilon, t, \dot{\epsilon})$  для сплава АМгЗ (с указанием химического состава), позаимствованные из справочника [10], приведены на рис. 101 и 102.

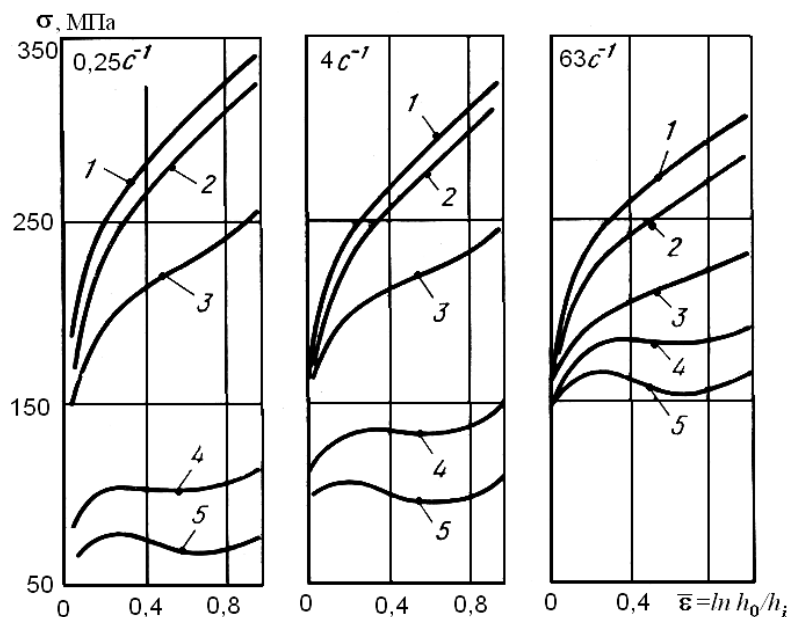


Рис. 101. Кривые испытаний на сжатие сплава АМгЗ (0,068 % Cu; 0,04 % Mn; 2,74% Mg; 0,10 % Si; 0,19 % Fe) после деформации и отжига. Температура,  $^{\circ}\text{C}$ : 1 – 20; 2 – 120; 3 – 240; 4 – 360; 5 – 480

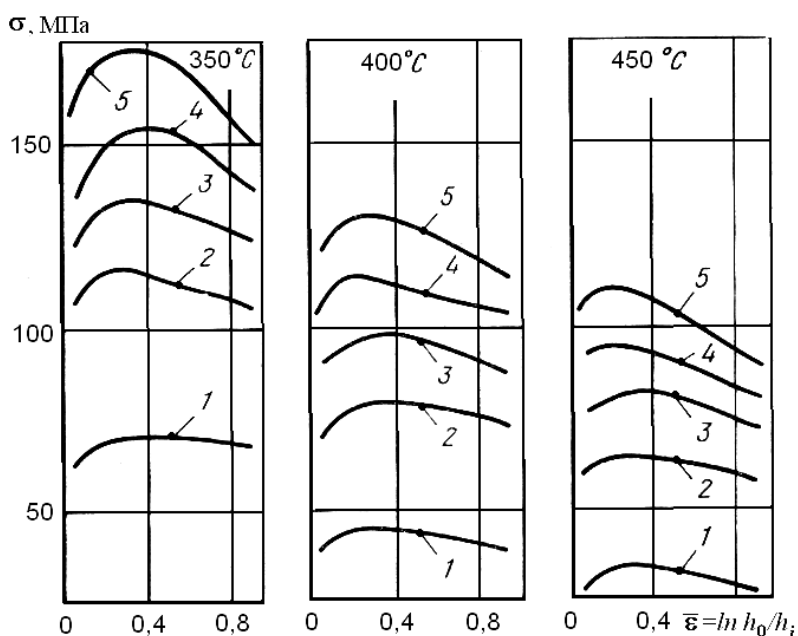


Рис. 102. Кривые деформационного упрочнения сплава АМгЗ (0,4 % Mn; 0,4 % Si; 3,6 % Mg; 95,1 % Al) после горячего прессования и отжига. Скорость деформации,  $\text{s}^{-1}$ : 1 – 0,01; 2 – 1; 3 – 10; 4 – 100; 5 – 200

Теми же авторами [10, 17] получены и опубликованы зависимости сопротивления деформации от степени, скорости и температуры деформации для сплавов АМг4 (рис. 103, 104), АМг5 (рис. 105, 106,

107) и АМг6 (рис. 108, 109, 110). Для всех исследуемых сплавов приведен химический состав. Кривые построены на основании результатов испытаний на сжатие и растяжение, проведенных на кулачковом пластометре.

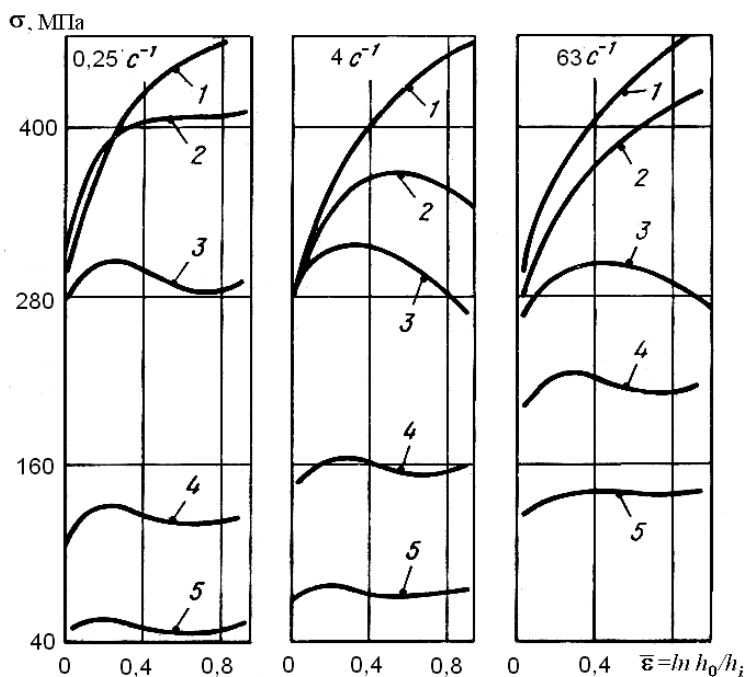


Рис. 103. Кривые испытаний на сжатие сплава АМг4 (0,01 % Cu; 0,77 % Mn; 4,71 % Mg; 0,10 % Si; 0,6 % Fe; 0,13 % Cr). Температура,  $^{\circ}\text{C}$ :  
1 – 20; 2 – 120; 3 – 240; 4 – 360; 5 – 480

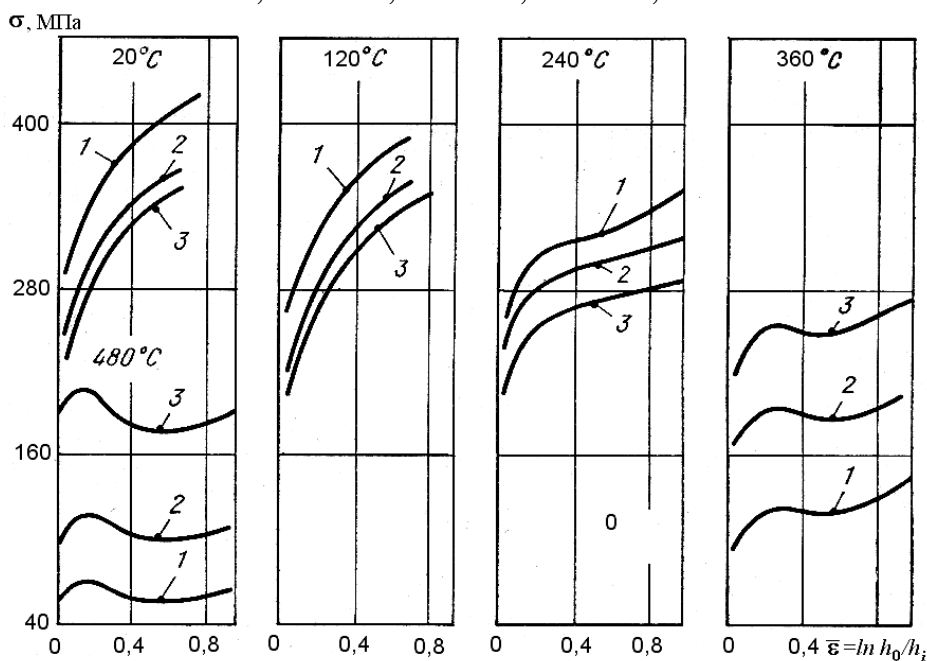


Рис. 104. Кривые испытаний на сжатие сплава АМг4 (0,036 % Cu; 0,04 % Mn; 4,83 % Mg; 0,15 % Si; 0,22 % Fe; 0,14 % Cr). Скорость деформации,  $\text{c}^{-1}$ :  
1 – 0,25; 2 – 4; 3 – 63

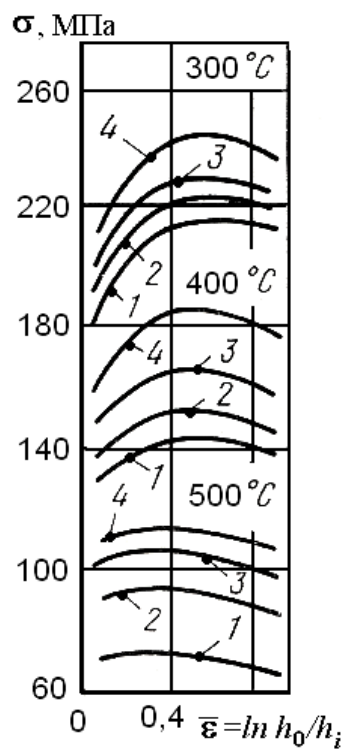


Рис. 105. Кривые деформационного упрочнения сплава АМг5 (0,1 % Cu; 0,19 % Mn; 5,11 % Mg; 0,21 % Si; 0,29 % Fe). Скорость деформации,  $\text{с}^{-1}$ :  
1 – 0,01; 2 – 1; 3 – 10; 4 – 100; 5 – 200

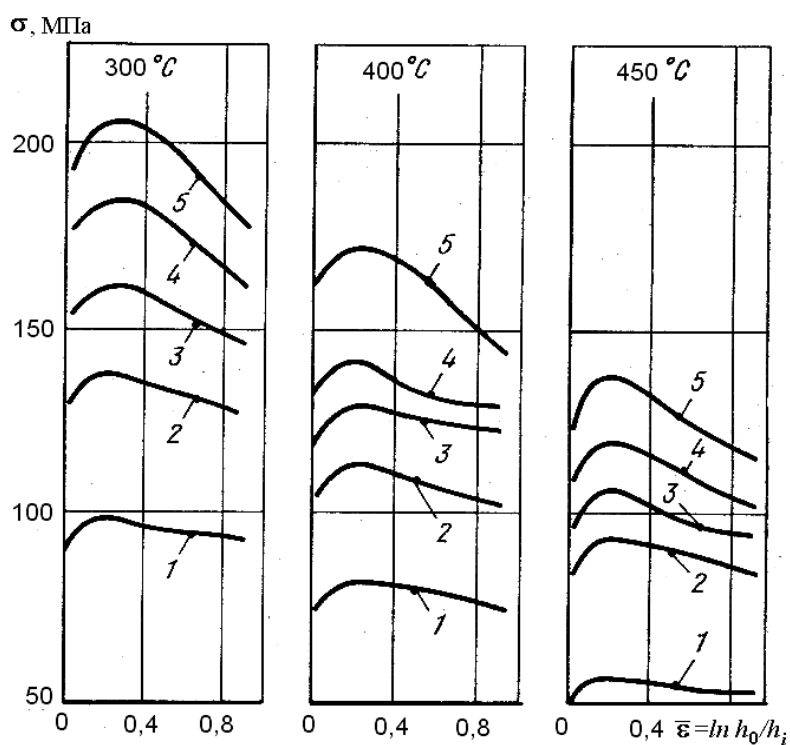


Рис. 106. Кривые деформационного упрочнения сплава АМг5 (5,2 % Mg; 0,5 % Mn; 93,4 % Al) после горячей прокатки и отжига. Скорость деформации,  $\text{с}^{-1}$ : 1 – 0,01; 2 – 1; 3 – 10; 4 – 100; 5 – 200



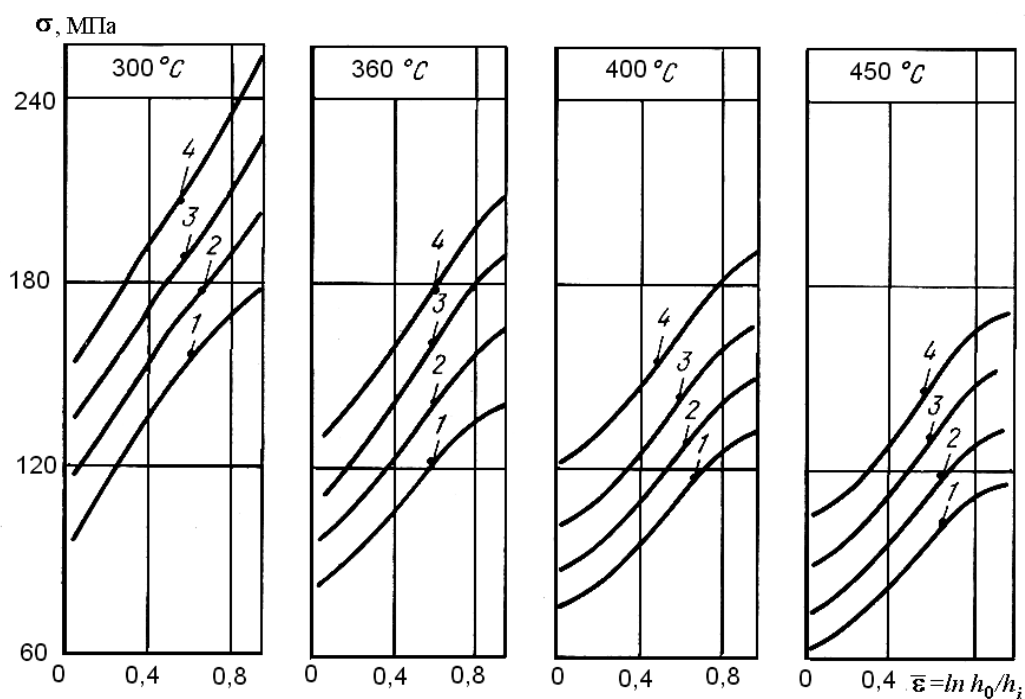


Рис. 107. Кривые деформационного упрочнения сплава типа АМг5В.  
Скорость деформации,  $\text{с}^{-1}$ : 1 – 0,5; 2 – 5; 3 – 20; 4 – 60

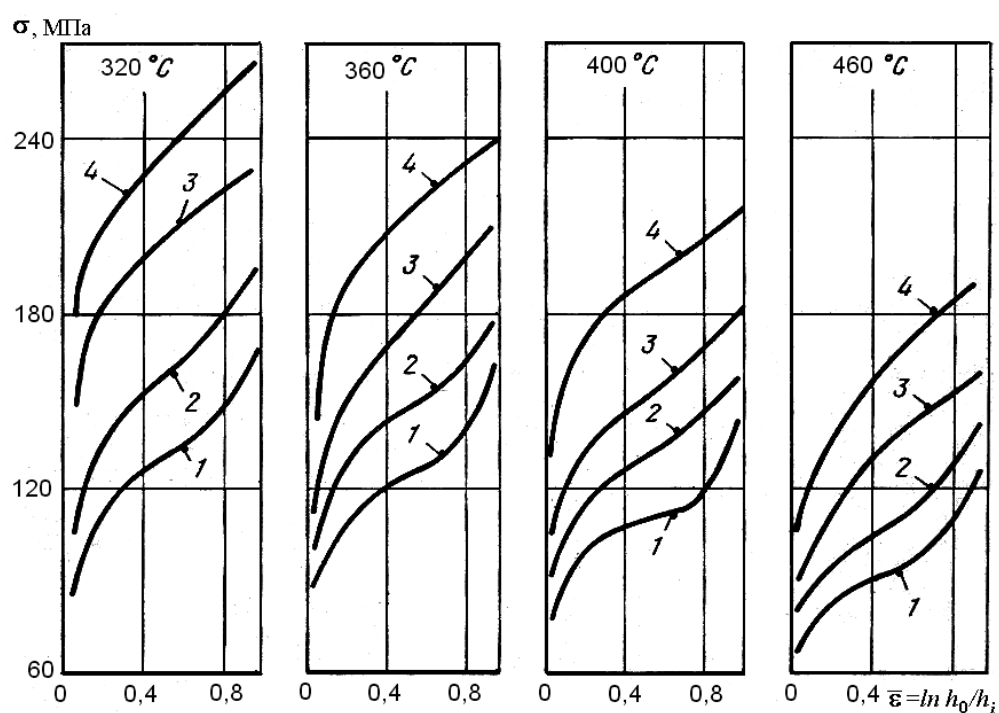


Рис. 108. Кривые деформационного упрочнения сплава типа АМг6.  
Скорость деформации,  $\text{с}^{-1}$ : 1 – 0,5; 2 – 5; 3 – 30; 4 – 60

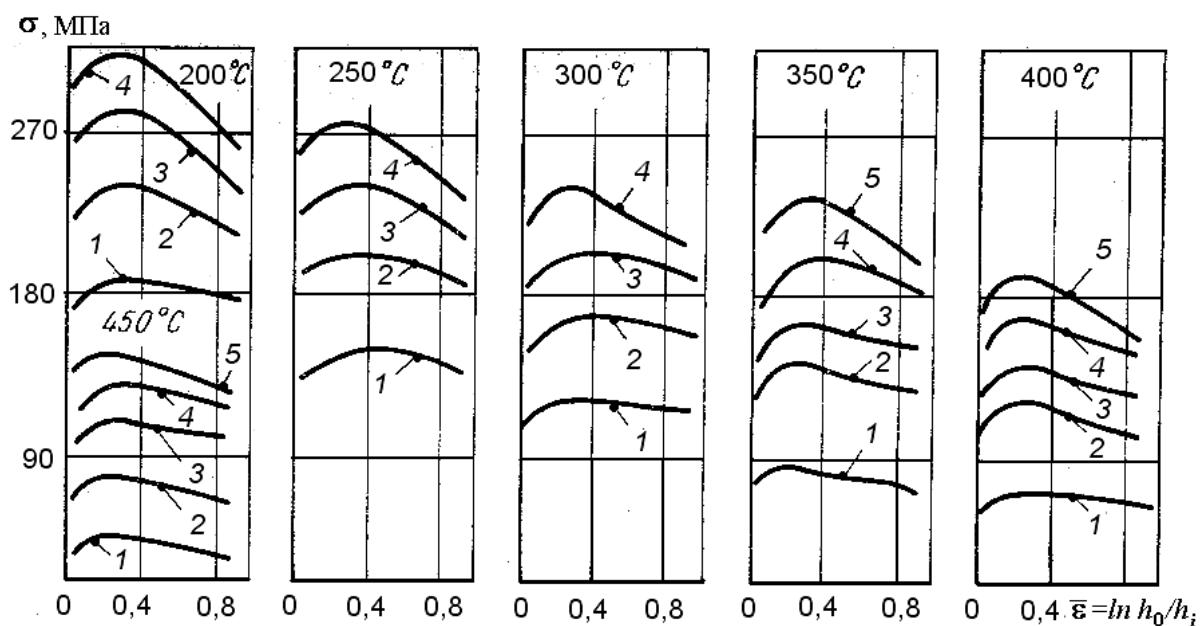


Рис. 109. Кривые деформационного упрочнения сплава АМг6 (6,2 % Mg; 0,65 % Mn; 92,2 % Al) после горячего прессования и отжига. Скорость деформации,  $\text{с}^{-1}$ : 1 – 0,01; 2 – 1; 3 – 10; 4 – 100; 5 – 200

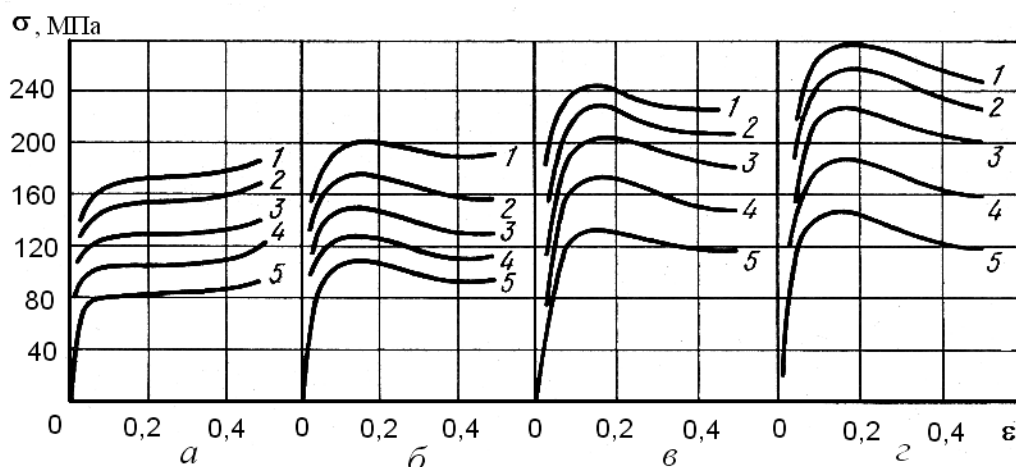


Рис. 110. Кривые деформационного упрочнения сплава АМг6 при различных скоростях деформации: 1 (а), 10 (б), 100 (в), и 300  $\text{с}^{-1}$  (г). Температура,  $^{\circ}\text{C}$ : 1 – 300; 2 – 350; 3 – 400; 4 – 450; 5 – 500

Аналогичные зависимости  $\sigma_s = \sigma_s(\varepsilon, t, \xi)$ , где  $\xi$  – скорость деформации, приведены в книге [27]. К сожалению, не указаны химический состав сплава АМг6 и состояние заготовки, из которой вырезались образцы для пластометрических испытаний. Эти зависимости изображены на рис. 111. На рис. 112 представлены кривые упрочнения сплава АМг6 (с указанием его химического состава) и функции термомеханических коэффициентов. В качестве базового режима при

описании опытных зависимостей принят следующий:  $\varepsilon_0 = \frac{\Delta h}{h_0} = 0,3$  (30 %);  $t_0 = 400^\circ\text{C}$ ;  $u_0 = 10 \text{ c}^{-1}$ ;  $\sigma_0 = 105 \text{ МПа}$  [25, 41].

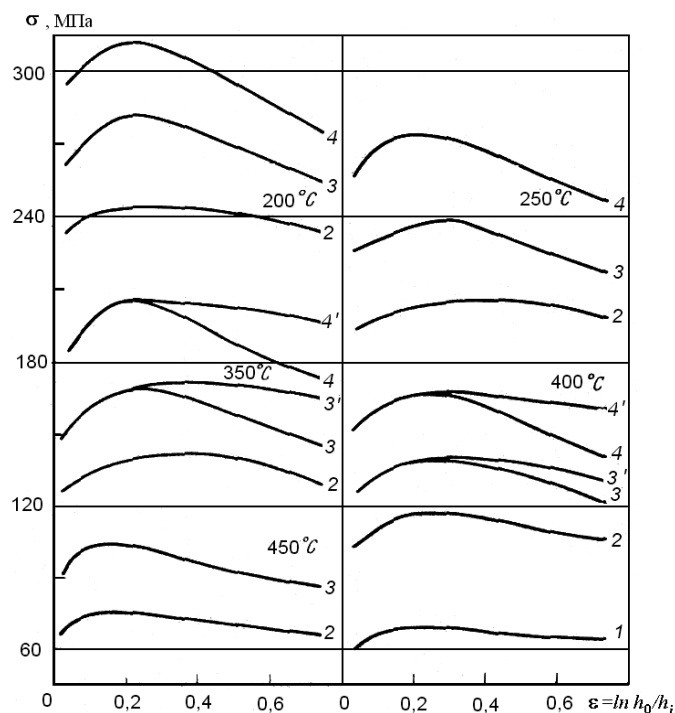


Рис. 111. Кривые испытаний на пластометре сплава АМгб:  
1 –  $\xi = 0,01 \text{ c}^{-1}$ ; 2 –  $\xi = 1 \text{ c}^{-1}$ ; 3 –  $\xi = 10 \text{ c}^{-1}$ ; 4 –  $\xi = 100 \text{ c}^{-1}$

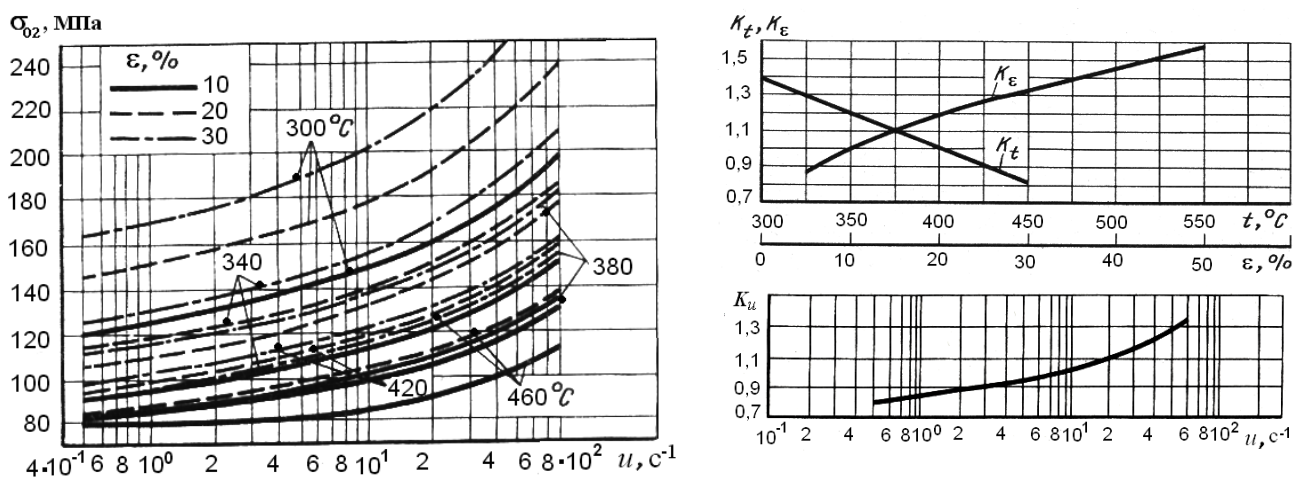


Рис. 112. Сопротивление деформации алюминиевого сплава АМгб  
(5,8...6,8 % Mg; 0,5...0,8 % Mn; 0,02...0,10 % Ti; 0,005...0,0005 % Be; ост. Al)

Зависимости  $\sigma_s = \sigma_s(t, \tau_d)$ , пригодные для анализа процессов прессования при достаточно больших степенях деформации, приведены на рис. 113. Кривые получены авторами работы [38] для сплава АМгб в результате испытаний на растяжение и сжатие. Точный хи-

мический состав исследуемого сплава и исходное состояние заготовки, из которой изготовлены образцы, к сожалению, не известны.

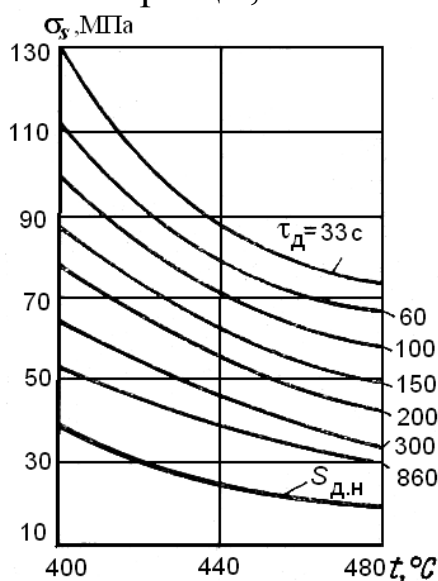


Рис. 113. Зависимость сопротивления деформированию сплава АМг6 от температуры  $t$  и длительности деформации  $\tau_d$

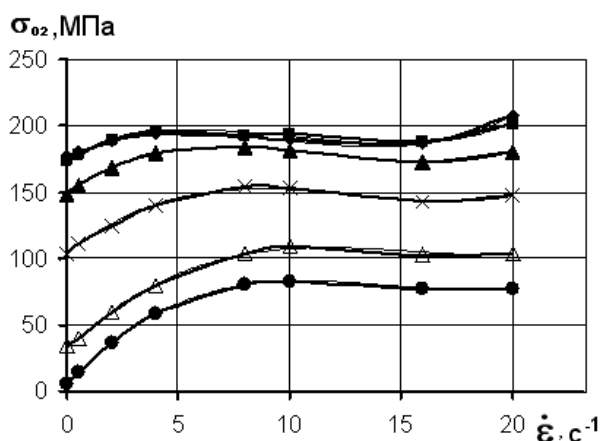


Рис. 114. Сопротивление деформации сплава АМг6 в литом состоянии при различных скоростях и температурах деформации:

◆ – 50°C; ■ – 150°C; ▲ – 250°C; х – 350°C; Δ – 450°C; ● – 500°C

## 5.5. Сплавы системы Al-Cu-Mn

Сплавы этой системы относят к классу жаропрочных. Кроме меди применяют специальные добавки титана, циркония, железа, никеля и тугоплавких металлов. Сплавы упрочняются термической обработкой – закалкой с последующим старением. Упрочняющими фазами жаропрочных алюминиевых сплавов являются:  $\text{CuAl}_2$ ,  $\text{FeNiAl}_9$ ,  $\text{Al}_6\text{Cu}_3\text{Ni}$  и др. Полученные при искусственном старении мелкодисперсные выделения этих фаз устойчивы против коагуляции и тем самым повышают жаропрочность соответствующих сплавов.

В отечественной практике получили распространение сплавы Д20 и 1201, химический состав которых приведен в табл. 24 [36]

Таблица 24

Средний химический состав сплавов системы (Al-Cu-Mn)

Сплав	Содержание компонентов, %				
	Cu	Mn	Ti	Zr	V
Д20	6,5	0,6	0,15	-	-
1201	6,5	0,3	0,06	0,17	0,1

Прямых аналогов сплавов системы (Al-Cu-Mn) в зарубежных стандартах нет. Близкие по химическому составу сплавы обязательно содержат, кроме Cu и Mn, кремний и магний, а упрочняющими фазами в этих сплавах являются  $Mg_2Si$ ,  $Al_2CuMg$ ,  $Al_4CuMg_5Si_4$  и др.

Эти деформируемые термоупрочняемые сплавы имеют высокие механические свойства при комнатной температуре, повышенных температурах до  $250^{\circ}C$  и криогенных температурах до  $-250^{\circ}C$ , технологичны в металлургическом производстве и отличаются хорошей свариваемостью.

Оба сплава подвергаются закалке с температуры  $535 \pm 5^{\circ}C$  и последующему искусственному старению при  $170...190^{\circ}C$  в течение 12...18 ч. Естественное старение, которое вполне успешно проходит в сплавах системы (Al-Cu), у этих сплавов практически полностью подавляется марганцем. Закаленные сплавы Д20 и 1201 имеют рекристаллизованную структуру. Структурное упрочнение и, в частности, пресс-эффект у них отсутствуют. Механические свойства этих сплавов примерно одинаковы, однако сплав 1201 имеет несколько лучшую свариваемость. Существенное повышение прочности сплавов достигается незначительной холодной пластической деформацией в свежезакаленном состоянии [34]. Коррозионная стойкость сплавов Д20 и 1201 сравнительно невысока, особенно в сварных конструкциях в зоне сварного шва. Эти сплавы относятся к термически упрочняемым свариваемым сплавам, значительно превосходящим по прочности термически неупрочняемые сплавы системы (Al-Mg).

Сопротивление деформации сплавов этой системы изучено мало. Лишь в работе [42] приводятся данные о скоростном упрочнении сплава Д20 в литом и деформированном состоянии, на основании которых построены и аппроксимированы кривые упрочнения, показанные на рис. 115 и 116.

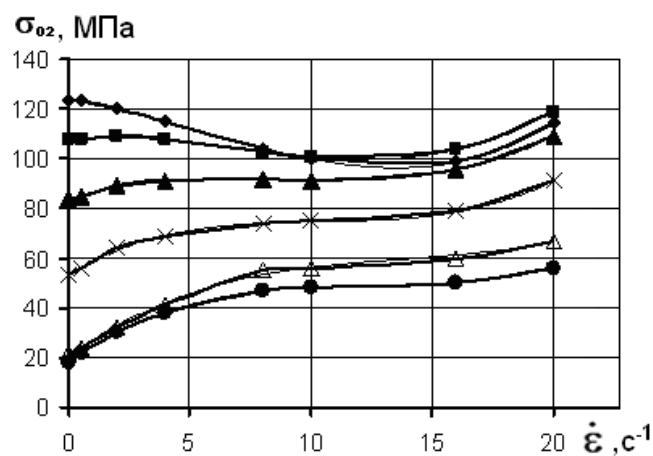


Рис. 115. Сопротивление деформации сплава Д20 в литом состоянии при различных скоростях и температурах деформации:

◆ – 50°C; ■ – 150°C; ▲ – 250°C; х – 350°C; Δ – 450°C; • – 500°C

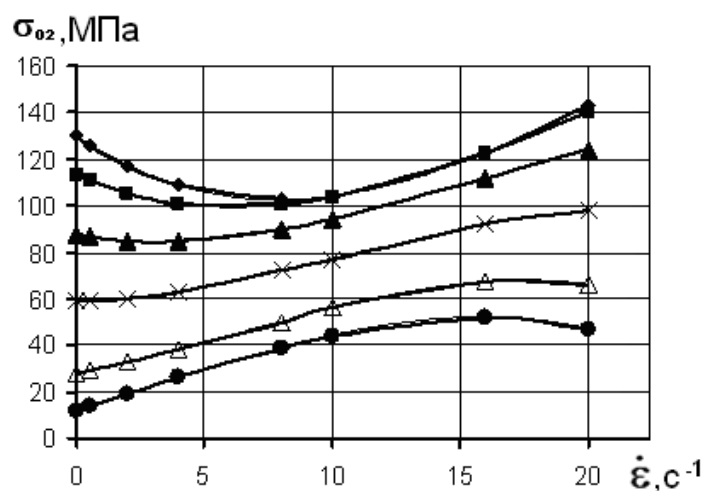


Рис. 116. Сопротивление деформации сплава Д20 в деформированном состоянии при различных скоростях и температурах деформации:

■ – 150°C; ▲ – 250°C; х – 350°C; Δ – 450°C; • – 500°C

Результаты испытаний на растяжение в холодном состоянии сплава Д20 при различных скоростях деформации представлены на рис. 117.

Влияние исходного состояния металла на сопротивление деформации, прочность и пластичность сплава Д20 при различных температурах показано на рис. 118. Приведенные зависимости получены при испытаниях на растяжение.

Данных об испытаниях на пластометрах с получением зависимостей  $\sigma_s = \sigma_s(\epsilon, t, \dot{\epsilon})$  для сплавов Д20 и 1201 в доступной литературе не обнаружено.

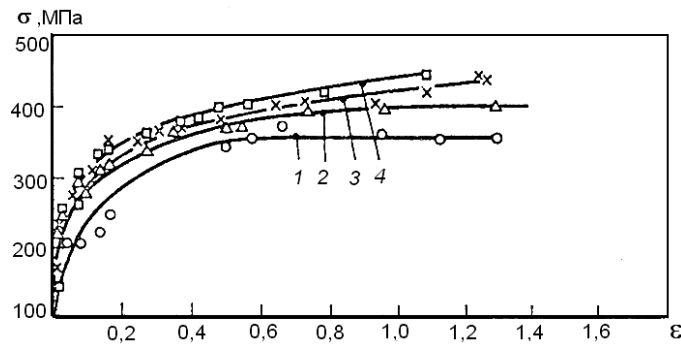


Рис. 117. Кривые деформационного упрочнения сплава Д20;  
 $\epsilon \text{ с}^{-1}$ : 1 –  $1 \cdot 10^0$ ; 2 –  $1 \cdot 10^{-1}$ ; 3 –  $1 \cdot 10^{-2}$ ; 4 –  $1 \cdot 10^{-3}$

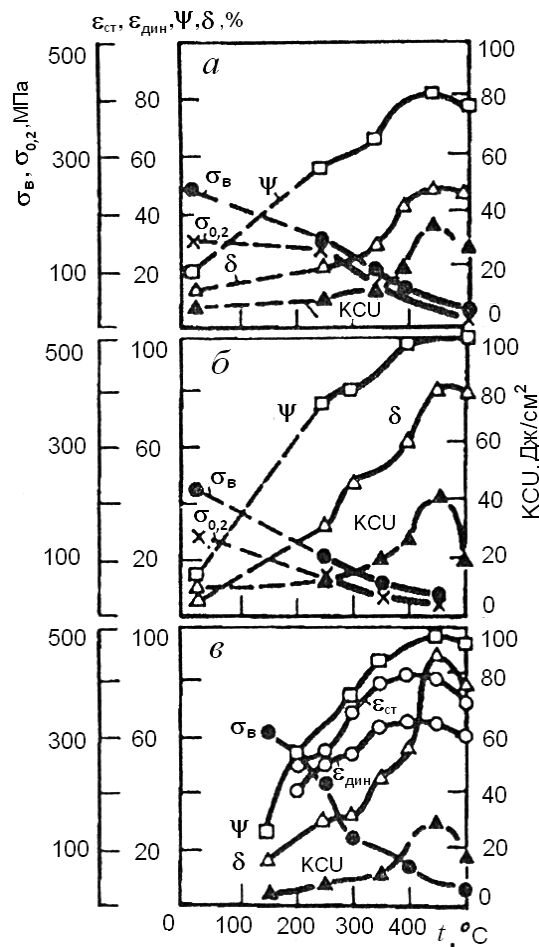


Рис. 118. Диаграммы прочности и пластичности сплава Д20 в литом негомогенизированном (а), в литом гомогенизированном (б) и горячедеформированном (в) состояниях

## 5.6. Сплавы системы Al-Cu-Mg

Эти термически упрочняемые сплавы приобрели название дюралюминов, после того как в 1906 г. немецкий исследователь А. Вильм предложил способ упрочнения алюминия с медью и магнием закалкой с последующим старением.

Отечественные сплавы системы (Al-Cu-Mg) производятся по ГОСТ 4784-97, химический состав которых приведен в табл. 25.

Таблица 25

Химический состав алюминиевых сплавов по ГОСТ 4784-97, %

Марка сплава	Цифровое обозначение	Al, не менее	Массовая доля элементов, %									Прочие примеси	
			Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Другие элементы	Каждая	Сумма
Д1	1110	остальное	0,2-0,8	0,7	3,5-4,5	0,4-1	0,4-0,8	0,1	0,25	0,15	Ti+Zr 0,2	0,05	0,15
Д16	1160	остальное	0,5	0,5	3,8-4,9	0,3-0,9	1,2-1,8	0,1	0,25	0,15	Ti+Zr 0,2	0,05	0,15
Д16ч	-	остальное	0,2	0,3	3,8-4,9	0,3-0,9	1,2-1,8	0,1	0,25	0,15	-	0,05	0,15
В65	1165	остальное	0,25	0,2	3,9-4,5	0,3-0,5	0,15-0,3	-	0,1	0,1	-	0,05	0,1
Д18	1180	остальное	0,5	0,5	2,2-3	0,2	0,2-0,5	0,1	0,1	-	-	0,05	0,15
Д19	1190	остальное	0,5	0,5	3,8-4,3	0,5-1	1,7-2,3	-	0,1	0,1	Be 0,0002-0,005	0,05	0,1
Д19ч	-	остальное	0,2	0,3	3,8-4,3	0,4-0,9	1,7-2,3	-	0,1	0,1	Be 0,0002-0,005	0,05	0,1

К данной системе сплавов также относятся сплавы ВАД1 и ВД17 с химическим составом, данным в табл. 26.

Таблица 26

Химический состав сплавов ВАД1 и ВД17

Сплав	Содержание компонентов, %				
	Cu	Mg	Mn	Ti	Zr
ВАД1	4,1	2,5	0,60	0,06	0,15
ВД17	3,0	2,2	0,55	-	-

Аналогичные сплавы группы 2000 по стандарту ISO 209-1:1989Е приведены в табл. 27, а по стандарту DIN EN 573-31:1994, Германия – в табл. 28.

Таблица 27

Химический состав алюминиевых деформируемых сплавов по ISO 209-1:1989Е, % не более

Марка сплава	Номер**	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Zr	Примечания	Прочие		Al
												Каждый	Всего	
AlCu2,5Mg	2117	0,8	0,7	2,2-3	0,2	0,2-0,5	0,1	0,25	-	-	-	0,05	0,15	остальное
AlCu4MgSi	2017	0,2-0,8	0,7	3,5-4,5	0,4-1	0,4-0,8	0,1	0,25	0,15	-	Ti+Zr 0,2***	0,05	0,15	остальное
AlCu4MgSi(A)	2017A	0,2-0,8	0,7	3,5-4,5	0,4-1	0,4-1	0,1	0,25	-	-	Ti+Zr 0,2	0,05	0,15	остальное
AlCu4SiMg	2014	0,5-1,2	0,7	3,9-5	0,4-1,2	0,2-0,8	0,1	0,25	0,5	-	Ti+Zr 0,2***	0,05	0,15	остальное
AlCu4SiMg(A)	2014A	0,5-0,9	0,5	3,9-5	0,4-1,2	0,2-0,8	0,1	0,25	0,15	-	Ti+Zr 0,2	0,05	0,15	остальное
AlCu4Mg1	2024	0,5	0,5	3,8-4,9	0,3-0,9	1,2-1,8	0,1	0,25	0,15	-	Ti+Zr 0,2***	0,05	0,15	остальное
AlCu4PbMg	2030	0,8	0,7	3,3-4,5	0,2-1	0,5-1,3	0,1	0,5	0,2	-	Pb 0,8-1,5; Bi 0,2	0,1	0,3	остальное



**Химический состав алюминиевых деформируемых сплавов  
по стандарту DIN EN 573-31:1994, Германия, %**

Номер сплава	Марка	Основные компоненты											Прочие элементы		Al, не менее
		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ga	V	Ti	в отдельности	в сумме	
ENAW 2001	ENAW-AlCu5,5MgMn	0,2	0,2	5,2-6	0,15-0,5	0,2-0,45	0,1	0,05	0,1	-	-	0,2	0,05	0,15	остальное
EN AW 2007	ENAW-AlCu4PbMgMn	0,8	0,8	3,3-4,6	0,5-1	0,4-1,8	0,1	0,2	0,8	-	-	0,2	0,1	0,3	остальное
ENAW2014A	ENAW-AlCu4SiMg(A)	0,5-0,9	0,5	3,9-5	0,4-1,2	0,2-0,8	0,1	0,1	0,25	-	-	0,15	0,05	0,15	остальное
ENAW 2214	ENAW-AlCu4SiMg(B)	0,5-1,2	0,3	3,9-5	0,4-1,2	0,2-0,8	0,1	-	0,25	-	-	0,15	0,05	0,15	остальное
ENAW2017A	ENAW-AlCu4MgSi(A)	0,2-0,8	0,7	3,5-4,5	0,4-1	0,4-1	0,1	-	0,25	-	-	-	0,05	0,15	остальное
ENAW 2117	EN AW-AlCu2,5Mg	0,8	0,7	2,2-3	0,2	0,2-0,5	0,1	-	0,25	-	-	-	0,05	0,15	остальное
ENAW2618A	ENAW-AlCu2Mg1,5Ni	0,15-0,25	0,9-1,4	1,8-2,7	0,25	1,2-1,8	-	0,8-1,4	0,15	-	-	0,2	0,05	0,15	остальное
EN AW 2024	EN AW-AlCu4Mg	0,5	0,5	3,8-4,9	0,3-0,9	1,2-1,8	0,1	-	0,25	-	-	0,15	0,05	0,15	остальное
EN AW 2124	ENAW-AlCu4Mg(A)	0,2	0,3	3,8-4,9	0,3-0,9	1,2-1,8	0,1	-	0,25	-	-	0,15	0,05	1,15	остальное
EN AW 2030	EN-AW-AlCu4PbMg	0,8	0,7	3,3-4,5	0,2-1	0,5-1,3	0,1	-	0,5	-	-	0,2	0,1	0,3	остальное
EN AW 2031	ENAW-AlCu2,5NiMg	0,5-1,3	0,6-1,2	1,8-2,8	0,5	0,6-1,2	-	0,6-1,4	0,2	-	-	0,2	0,05	0,15	остальное
EN AW 2091	ENAW-AlCu2Li2Mg1,5	0,2	0,3	1,8-2,5	0,1	1,1-1,9	0,1	-	0,25	-	-	0,1	0,05	0,15	остальное

К системе (Al-Cu-Mg) могут быть отнесены сплавы группы 2000, производимые по стандарту JIS, Япония (табл. 29).

Таблица 29

**Химический состав алюминиевых деформируемых сплавов  
по стандартам JIS, Япония, %**

Номер сплава	Легирующие компоненты и примеси									Прочие примеси		Al
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Zr, Zr+Ti, V	Ti	в отдельности	в сумме	
2219	0,2	0,3	5,8-6,8	0,2-0,4	0,02	-	0,1	V 0,05-0,15; Zr 0,1-0,25	0,02-0,1	0,05	0,15	остальное
2024	0,5	0,5	3,8-4,9	0,3-0,9	1,2-1,8	0,1	0,25	Zr+Ti 0,2	0,15	0,05	0,15	остальное
2025	0,5-1,2	1	3,9-5,0	0,4-1,2	0,05	0,1	0,25	-	0,15	0,05	0,15	остальное
2N01	0,5-1,3	0,6-1,5	1,5-2,5	0,2	1,2-1,8	-	0,2	Ni 0,6-1,4	0,2	0,05	0,15	остальное

Дюралюмины всегда содержат примеси железа и кремния. Содержание каждого из них желательно ограничивать 0,5 %, причем для получения лучших механических свойств соотношение концентраций Fe и Si в дюралюминах должно быть близко 1:1. В последние годы для ответственных изделий применяется сплав Д16ч, в котором содержание железа и кремния меньше 0,3 %, что обуславливает более высокие значения характеристик вязкости разрушения. По сравнению с техническим алюминием и сплавами системы (Al-Mn) дюралюмины отличаются пониженной коррозионной стойкостью. Сплавы этой системы можно разделить на четыре подгруппы:

- классический дюралюмин Д1;
- дюралюмин повышенной прочности Д16;
- сплавы повышенной жаропрочности Д18 и В65.

Дюралюмины подвергаются закалке и чаще всего естественному старению. При закалке необходимо жесткое соблюдение рекомендованных интервалов температур нагрева под закалку: Д1 – 495...510<sup>0</sup>С; Д19 – 495...505<sup>0</sup>С; Д16 – 492...500<sup>0</sup>С. Нагрев под закалку до температур выше допустимых приводит к оплавлению легкоплавких структурных составляющих по границам зерен, что сопровождается окислением металла и образованием при последующей кристаллизации жидкой фазы усадочной пористости. Это явление называется пережогом и вызывает снижение усталостной прочности, коррозионной стойкости и пластичности. Для предотвращения при распаде твердого раствора выделения промежуточных интерметаллидных фаз по границам зерен дюралюмины при закалке следует охлаждать в холодной воде при минимальном времени переноса изделий из печи в закалочный бак.

Важной отличительной особенностью сплава ВАД1 по сравнению с другими дюралюминами – его хорошая свариваемость не только точечной контактной сваркой, но и аргонно-дуговой.

Несмотря на существование других высокопрочных алюминиевых сплавов, дюралюмины типа Д16, и особенно чистые марки Д16ч, Д16оч (1163, имеющий американский аналог 2024), остаются в настоящее время наиболее важным и распространенным конструкционным материалом в авиастроении.

Кривые деформационного упрочнения сплава Д1 при испытаниях на сжатие и растяжение приведены в справочниках [11 и 25] и на рис. 119-122. Деформация образцов осуществлялась на универсальных испытательных машинах при относительно малой скорости деформирования.

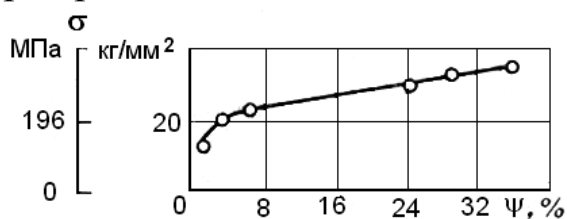


Рис. 119. Кривая упрочнения при растяжении отожженного дюралюминия Д1

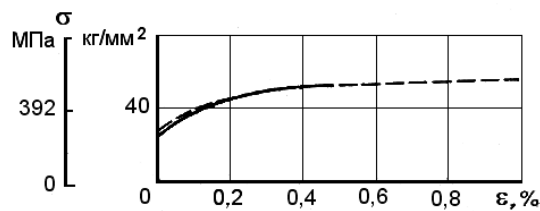


Рис. 120. Кривая упрочнения при сжатии отожженного дюралюминия Д1

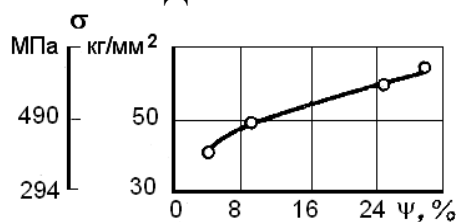


Рис. 121. Кривая упрочнения при растяжении закаленного дюралюминия Д1

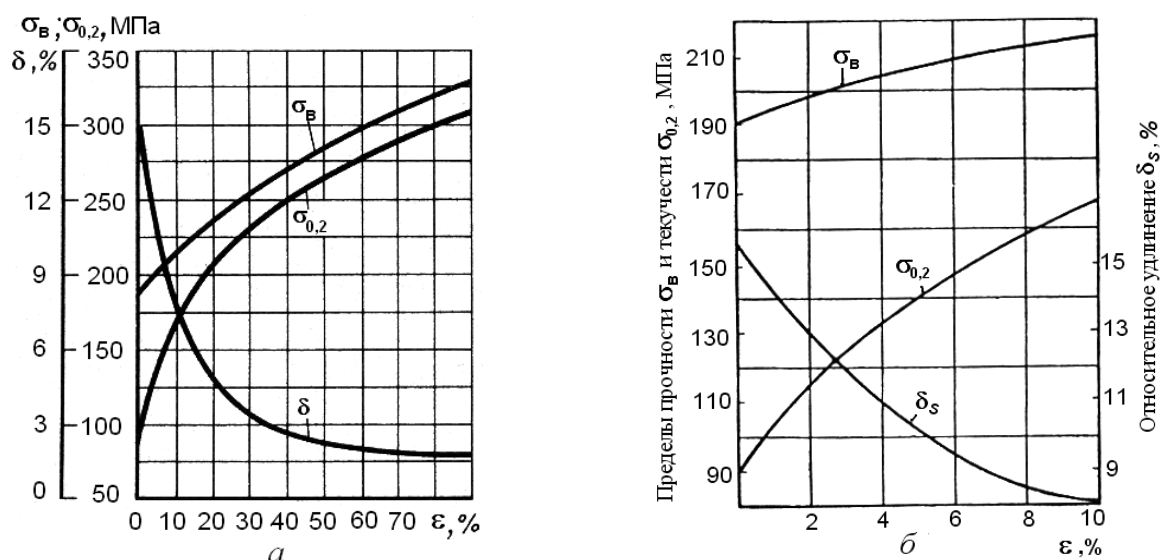


Рис. 122. Кривые упрочнения алюминиевого сплава Д1 (3,8...4,8 % Cu; 0,4...0,8 % Mg; 0,4...0,8 % Mn; <0,5% Si; <0,5% Fe; ост. Al) по данным [11] (а) и [47] (б)

Графики зависимостей  $\sigma_s = \sigma_s(\epsilon, t, \dot{\epsilon})$  для сплава Д1 при различных исходных состояниях металла представлены в справочнике [10] и на рис. 123 и 124. Кривые упрочнения получены испытаниями на растяжение и сжатие на кулачковом пластометре.

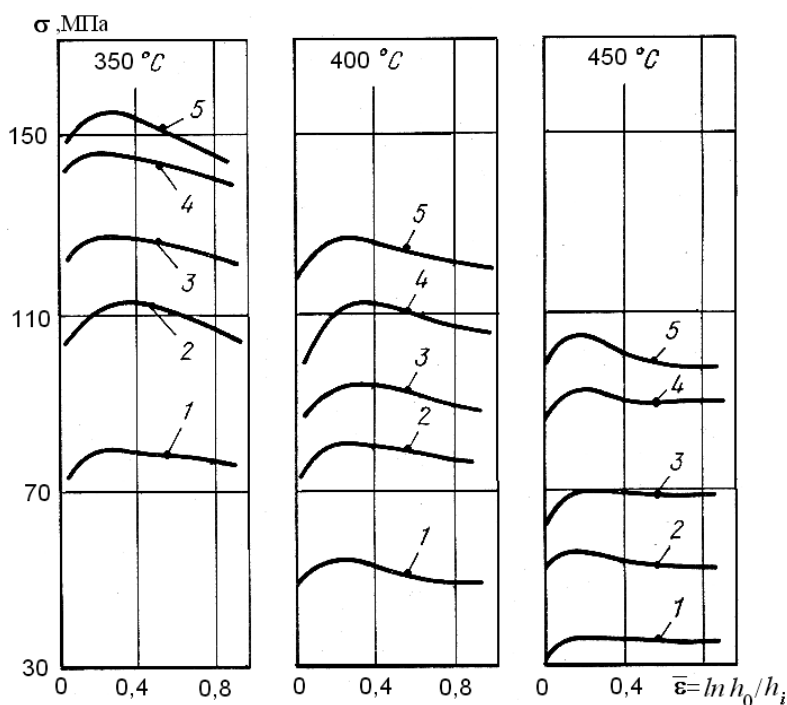


Рис. 123. Кривые деформационного упрочнения сплава Д1 (4,3 % Cu; 0,6 % Mg; 0,5 % Mn; 93,2% Al) после горячего прессования и отжига. Скорость деформации,  $\text{с}^{-1}$ : 1 – 0,001; 2 – 1; 3 – 10; 4 – 100; 5 – 200.

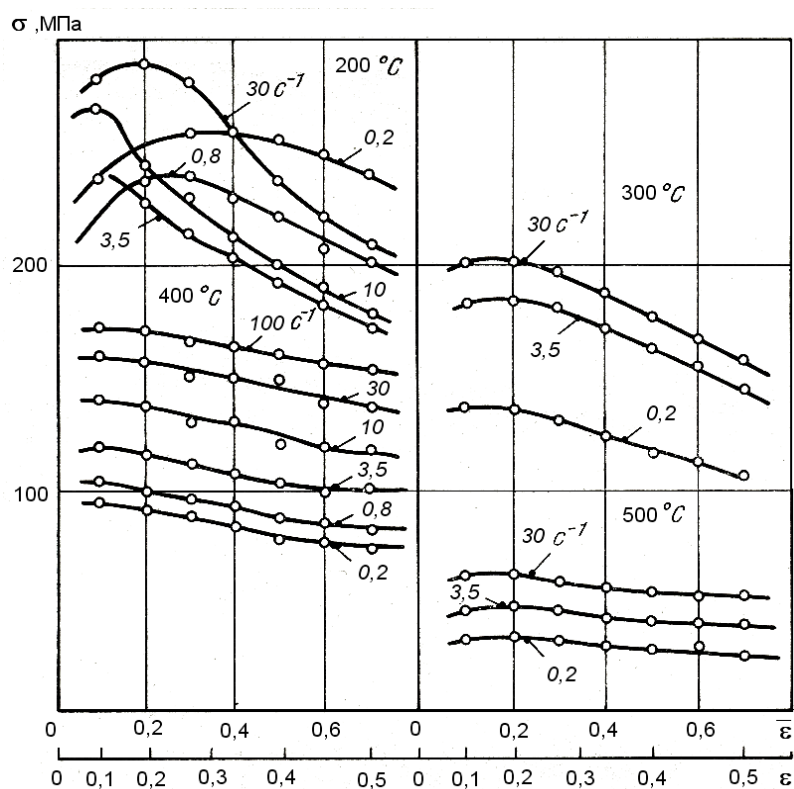


Рис. 124. Кривые деформационного упрочнения сплава типа Д1 (3,5 % Cu; 0,10 % Si; 0,5 % Mn; 0,45 % Mg; 0,5 % Fe; 94,9 % Al) после холодного волочения и отжига

Кривые скоростного упрочнения сплава Д1, представленные на рис. 124 и 126, построены по данным пластометрических исследований, выполненных авторами [42].

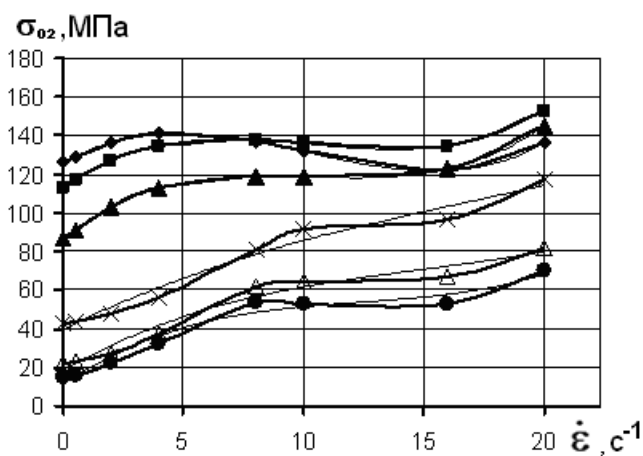


Рис. 125. Сопротивление деформации сплава Д1 в литом состоянии при различных скоростях и температурах деформации:

◆ – 50 °C; ■ – 150 °C; ▲ – 250 °C; х – 350 °C; Δ – 450 °C; • – 500 °C

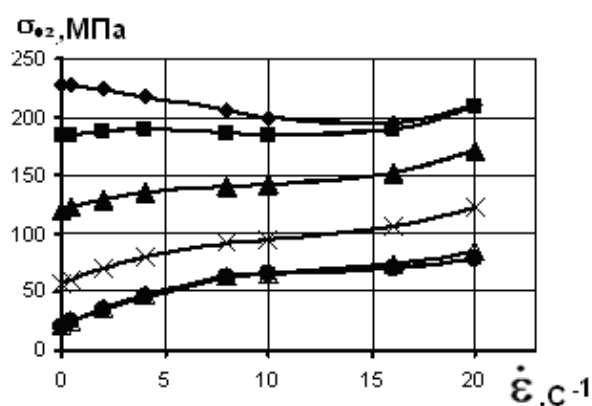


Рис. 126. Сопротивление деформации сплава Д1 в деформированном состоянии при различных скоростях и температурах деформации:

◆ – 50°C; ■ – 150°C; ▲ – 250°C; х – 350°C; Δ – 450°C; ● – 500°C

Сведения о деформационном упрочнении дюралюмина Д16 при испытаниях на растяжение образцов, изготовленных из упрочненного прокаткой сплава, опубликованы лишь в книге [44] (рис. 127).

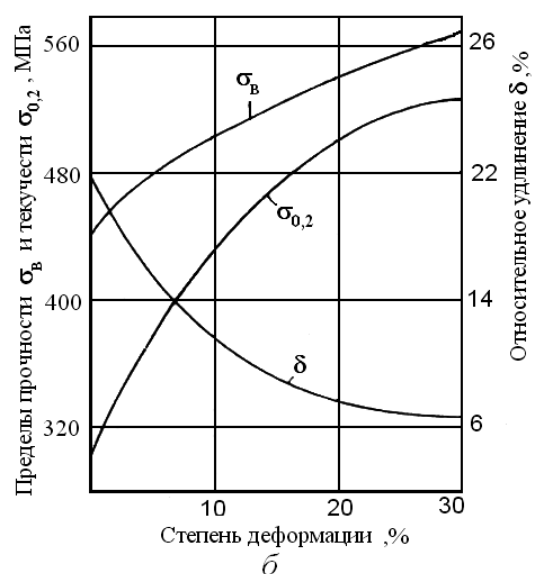
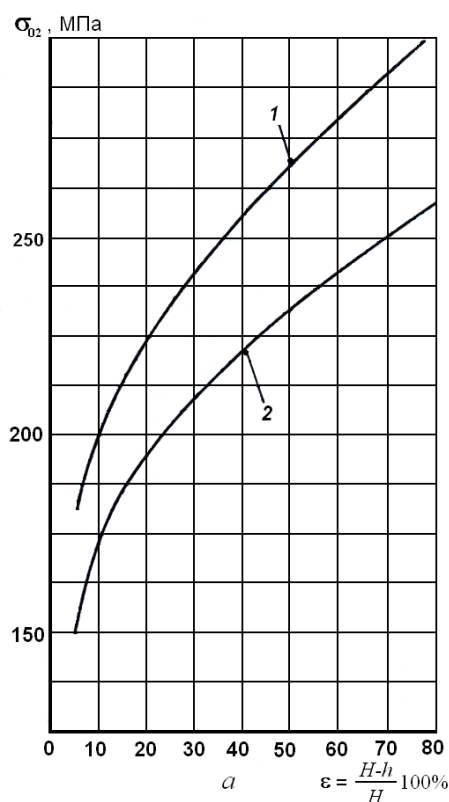


Рис. 127. Изменение механических свойств закаленного и естественно составленного сплава Д16 при холодной деформации по данным [44] (а) и [47] (б)

Значительно полнее в литературе представлены результаты пластометрических исследований сплава Д16 в горячем состоянии, выполненные на кулачковых, ротационных и торсионных пластометрах.

Кривые упрочнения в широком диапазоне варьирования температуры и скорости деформации показаны на рис. 128 [27]; 129, 130, 131 [10]; 132 [25]. Графики зависимостей  $\sigma_{02}$  от температуры испытаний и скорости деформации без учета влияния степени деформации, построенные по опытным данным пластометрических исследований [42], приведены на рис. 133.

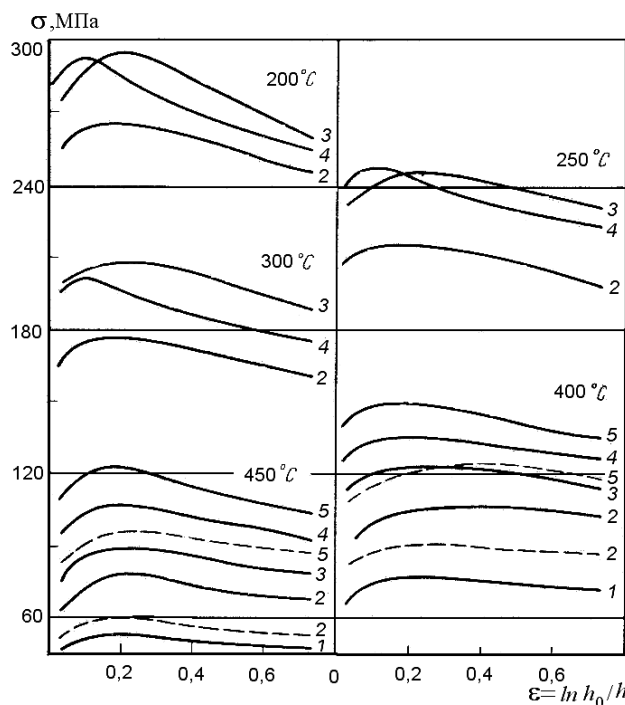


Рис. 128. Кривые испытаний на пластометре сплава Д16:  
 1 –  $\xi = 0,01 \text{ с}^{-1}$ ; 2 –  $\xi = 1 \text{ с}^{-1}$ ; 3 –  $\xi = 10 \text{ с}^{-1}$ ; 4 –  $\xi = 100 \text{ с}^{-1}$ ;  
 5 –  $\xi = 200 \text{ с}^{-1}$ ; пунктирная линия – литое состояние

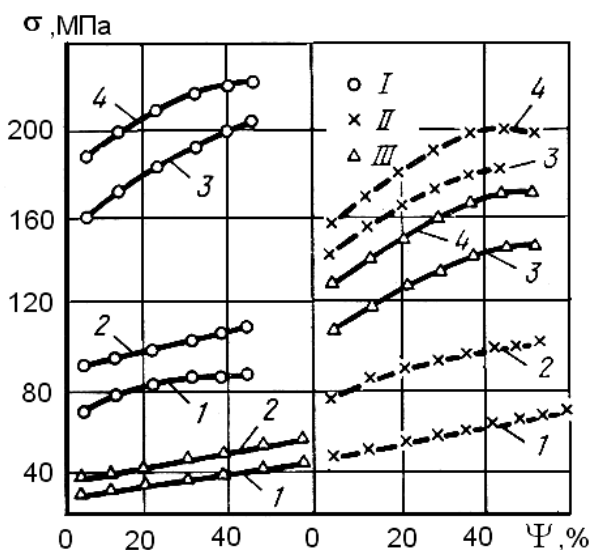


Рис. 129. Кривые деформационного упрочнения сплава Д16 при температурах 350 (I), 420 (II) и 480°C (III). Скорость деформации,  $\text{с}^{-1}$ :  
 1 –  $3 \cdot 10^{-2}$ ; 2 –  $14 \cdot 10^{-2}$ ; 3 – 4; 4 – 14

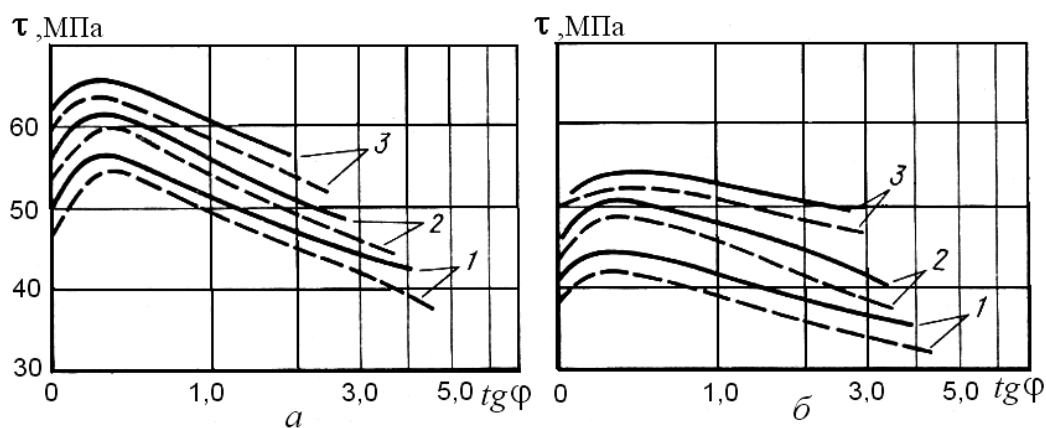


Рис. 130. Кривые испытаний на кручение сплава Д16 при 400 (а) и 450°С (б).

Скорость деформации,  $\text{с}^{-1}$ : 1 – 1,62; 2 – 5,45; 3 – 10,26;  
сплошные линии – скорость при прессовании 2,02 м/мин,  
штриховые – 3,09 м/мин

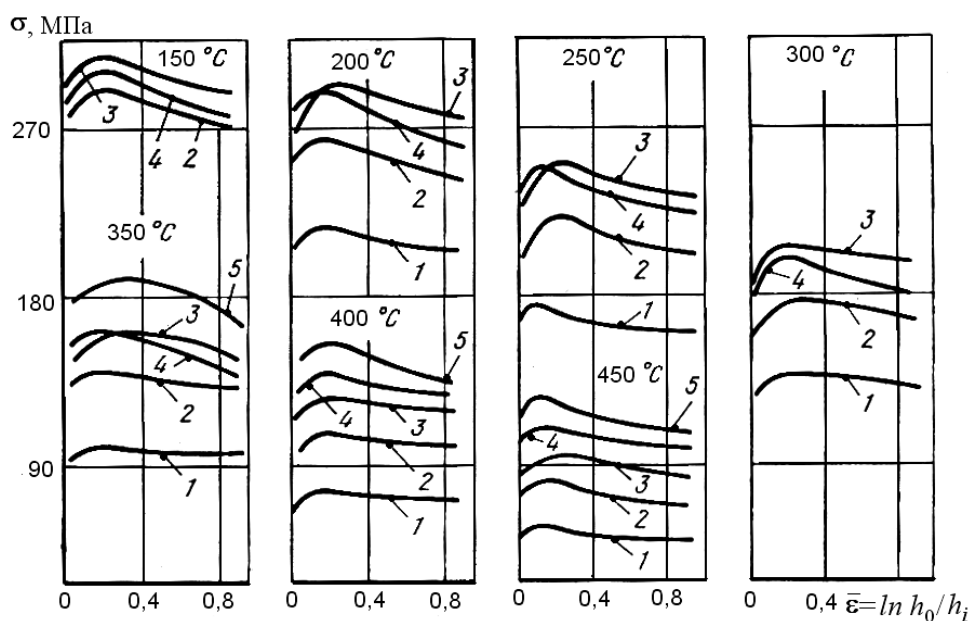


Рис. 131. Кривые деформационного упрочнения сплава Д16 (4,4 % Cu; 1,5 % Mg; 0,8 % Mn; 92,1 % Al) после горячего прессования и отжига.

Скорость деформации,  $\text{с}^{-1}$ : 1 – 0,01; 2 – 1; 3 – 10; 4 – 100; 5 – 200

Применительно к процессам прессования, характеризующимся высокими степенями деформации, рационально использовать зависимости  $\sigma_s$  от температуры и длительности деформации  $\tau_d$  при прессовании, приведенные в книге [38] и на рис. 134.



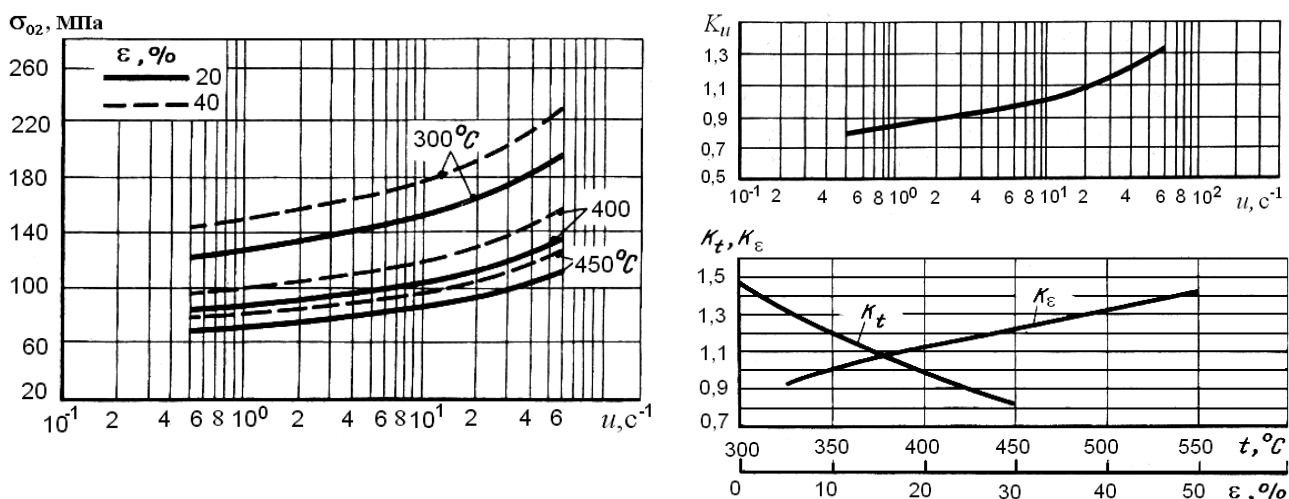


Рис. 132. Сопротивление деформации алюминиевого сплава Д16  
(3,8...4,5 % Cu; 1,2...1,8 % Mg; 0,3...0,9 % Mn; ≤0,5 % Si; ≥0,5 % Fe; ост. Al);  
 $\sigma_{02} = \sigma_0 K_\varepsilon K_t K_u$  при  $\sigma_0 = 91$  МПа

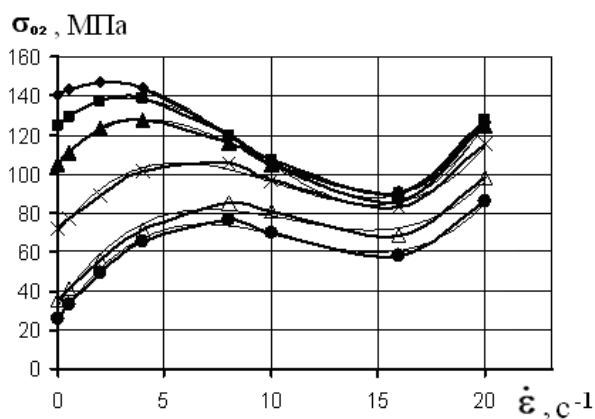


Рис. 133. Сопротивление деформации сплава Д16 в деформированном состоянии при различных скоростях и температурах деформации:  
♦ – 50°C; ■ – 150°C; ▲ – 250°C; х – 350°C; Δ – 450°C; • – 500°C

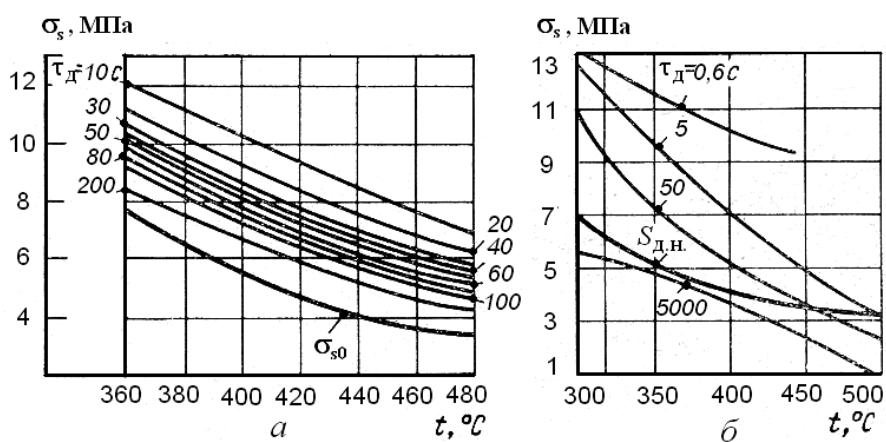


Рис. 134. Зависимость сопротивления деформированию сплава Д16 от температуры  $t$  и длительности деформации  $\tau_d$ : а – по данным И.Л. Перлина;  
б – по данным различных исследователей;  $\sigma_{s0}$  – [43]



Кривая  $\sigma_{s0}$  на графике рис. 134, а соответствует сопротивлению металла на входе в пластическую зону при прямом прессовании [43].

Опытных данных пластометрических исследований по другим сплавам системы (Al-Cu-Mg) значительно меньше. На рис. 135 приведена кривая упрочнения сплава Д18, полученная авторами [44] при испытаниях на растяжение в холодном состоянии предварительно деформированного на заданную степень металла.

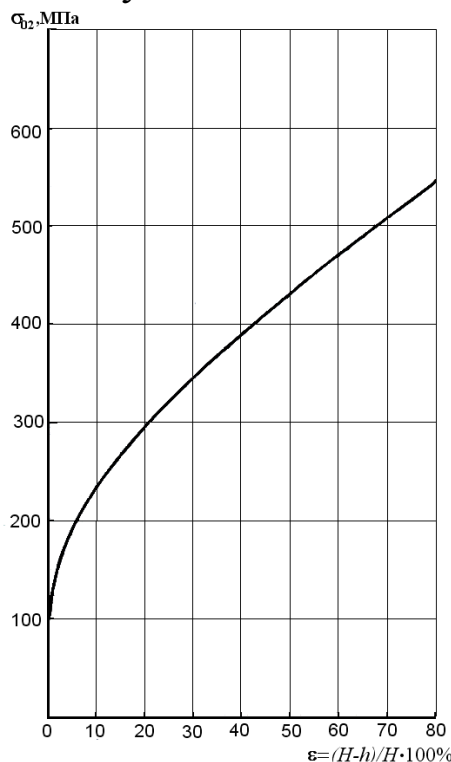


Рис. 135. Дюралюмин (4,2 % Cu; 0,74 % Mn; 0,52 % Si) Д18

Кривые скоростного упрочнения сплава Д18 в литом (рис. 136) и горячедеформированном (рис. 137) состояниях построены по опыт-ным данным [42].

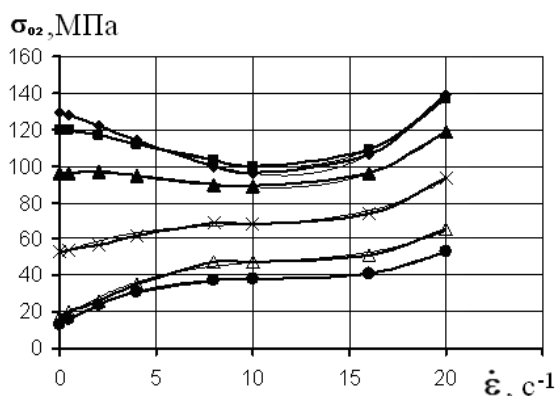


Рис. 136. Сопротивление деформации сплава Д18 в литом состоянии при различных скоростях и температурах деформации:

◆ – 50°C; ■ – 150°C; ▲ – 250°C; х – 350°C; Δ – 450°C; • – 500°C

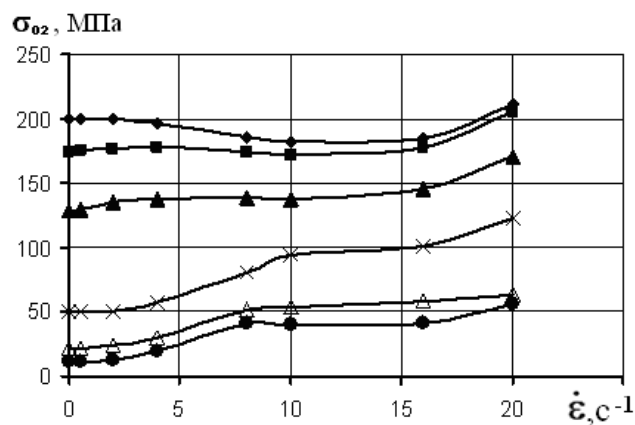


Рис. 137. Сопротивление деформации сплава Д18 в деформированном состоянии при различных скоростях и температурах деформации:

◆ – 50°C; ■ – 150°C; ▲ – 250°C; х – 350°C; Δ – 450°C; ● – 500°C

Аналогичные зависимости для дюралюминов Д19 и В65, также построенные по данным пластометрических исследований [13,42], приведены на рис. 138, 139 и 140.

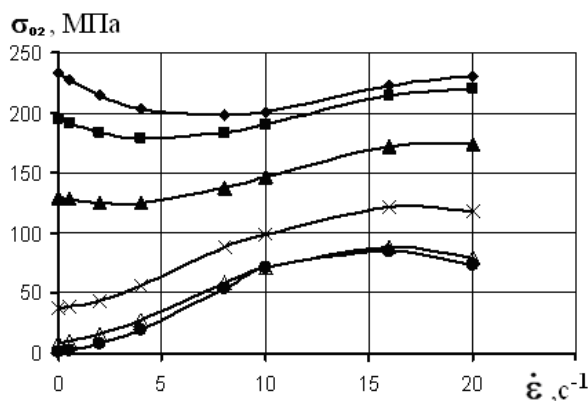


Рис. 138 [13]. Сопротивление деформации сплава Д19 в деформированном состоянии при различных скоростях и температурах деформации:

◆ – 50°C; ■ – 150°C; ▲ – 250°C; х – 350°C; Δ – 450°C; ● – 500°C

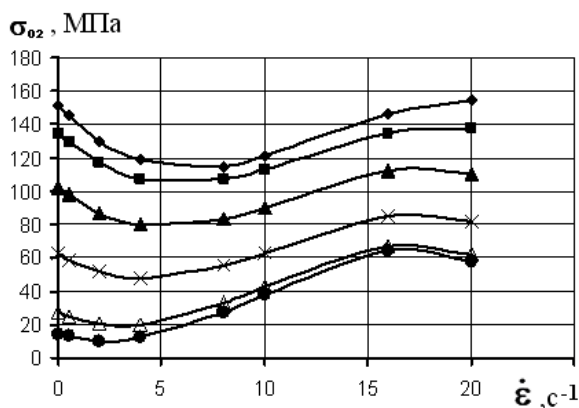


Рис. 139 [42]. Сопротивление деформации сплава В65 в литом состоянии при различных скоростях и температурах деформации:

◆ – 50°C; ■ – 150°C; ▲ – 250°C; х – 350°C; Δ – 450°C; ● – 500°C

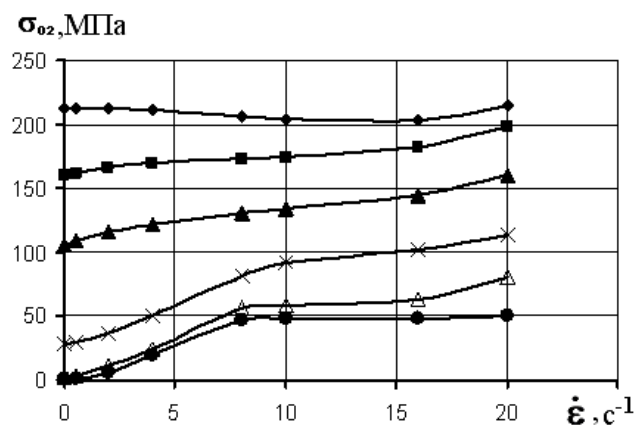


Рис. 140 [42]. Сопротивление деформации сплава В65 в деформированном состоянии при различных скоростях и температурах деформации:  
 ◆ – 50<sup>0</sup>С; ■ – 150<sup>0</sup>С; ▲ – 250<sup>0</sup>С; х – 350<sup>0</sup>С; Δ – 450<sup>0</sup>С; • – 500<sup>0</sup>С

Применительно к процессам прессовой горячейковки и штамповки в диапазоне скоростей деформации от 10 до 100 с<sup>-1</sup> приведенная на рис. 141 зависимость сопротивления деформации сплава ВД17 от  $\varepsilon$  и  $t$  может быть полезна при технологическом проектировании [39].

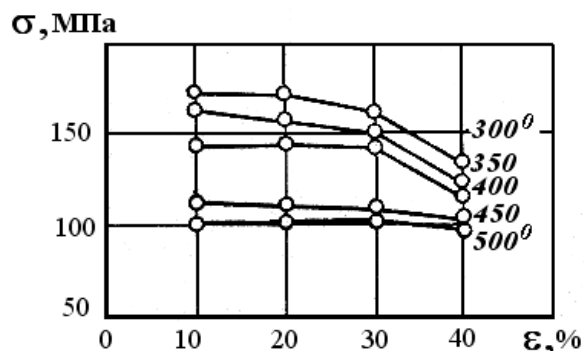


Рис. 141. Кривые течения алюминиевого сплава ВД17

## 5.7. Сплавы системы Al-Mg-Si

Сплавы этой системы впервые получены в 1923 г. Джефрисом и Арчером и нашли широкое применение в авиастроении, с чем связано их обобщающее название «авиали». Отечественные сплавы этой системы производят по ГОСТ 4784-97. Их химический состав приведен в табл. 30

В соответствии со стандартами ведущих зарубежных производителей алюминия и алюминиевых сплавов авиали относятся к группе сплавов 6000. По стандарту ISO209-1:1089E сплавы серии 6000 производятся с химическим составом, приведенным в табл. 31; по

стандарту DIN EN573-31:1994Ю Германия – в табл. 32; по стандарту JIS, Япония – в табл. 33.

Таблица 30

Химический состав алюминиевых сплавов по ГОСТ 4784-97, %

Марка сплава	Цифровое обозначение	Al, не менее	Массовая доля элементов, %									Прочие примеси	
			Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Другие элементы	Каждая	Сумма
АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ СИСТЕМЫ АЛЮМИНИЙ-МАГНИЙ-КРЕМНИЙ (Al-Mg-Si)													
АД31	1310	остальное	0,2-0,6	0,5	0,1	0,1	0,45-0,9	0,1	0,2	0,15	-	0,05	0,15
АД31Е	1310Е	остальное	0,3-0,7	0,5	0,1	0,03	0,35-0,8	0,03	0,1	-	В 0,06	0,03	0,1
АД33	1330	остальное	0,4-0,8	0,7	0,15-0,4	0,15	0,8-1,2	0,04-0,35	0,25	0,15	-	0,05	0,15
АД35	1350	остальное	0,7-1,3	0,5	0,1	0,4-1	0,6-1,2	0,25	0,2	0,1	-	0,05	0,15
АВ	1340	остальное	0,5-1,2	0,5	0,1-0,5	0,15-0,35	0,45-0,9	0,25	0,2	0,15	-	0,05	0,1

Таблица 31

Химический состав алюминиевых деформируемых сплавов по ISO 209-1:1989Е, % не более

Марка сплава	Номер**	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Zr	Примечания	Прочие		Al
												Каждый	Всего	
Al-Mg-Si (Серия 6000)														
Al-Mg-Si	6060	0,3-0,6	0,1-0,3	0,1	0,1	0,35-0,6	0,05	0,15	0,1	-	-	0,05	0,15	остальное
E-AlMgSi	6101	0,3-0,7	0,5	0,1	0,03	0,35-0,8	0,03	0,1	-	-	В 0,06	0,03	0,1	остальное
E-AlMgSi(A)	6101A	0,3-0,7	0,4	0,05	-	0,9	-	-	-	-	-	0,03	0,1	остальное
AlMg <sub>0,7</sub> Si	6063	0,2-0,6	0,35	0,1	0,1	0,45-0,9	0,1	0,1	0,1	-	-	0,05	0,15	остальное
AlMg <sub>0,7</sub> Si(A)	6063A	0,3-0,6	0,15-0,35	0,1	0,15	0,6-0,9	0,05	0,15	0,1	-	-	0,05	0,15	остальное
AlMg1SiCu	6061	0,4-0,8	0,7	0,15-0,4	0,15	0,8-1,2	0,04-0,35	0,25	0,15	-	-	0,05	0,15	остальное
AlMg1SiPb	6262	0,4-0,8	0,7	0,15-0,4	0,15	0,8-1,2	0,04-0,14	0,25	0,15	-	В 0,4-0,7; Pb 0,4-0,7	0,05	0,15	остальное
AlSiMg	6005	0,6-0,9	0,35	0,1	0,1	0,4-0,6	0,1	0,1	0,1	-	-	0,05	0,15	остальное
AlSiMg(A)	6005A	0,5-0,9	0,35	0,3	0,5	0,4-0,7	0,3	0,2	0,1	-	Mn+Cr 0,12-0,15	0,05	0,15	остальное
AlSi1MgMn	6082	0,7-1,3	0,5	0,1	0,4-1	0,6-1,2	0,25	0,2	0,1	-	-	0,05	0,15	остальное
AlSiMg <sub>0,5</sub> Mn	6351	0,7-1,3	0,5	0,1	0,4-0,8	0,4-0,8	-	0,2	0,2	-	-	0,05	0,15	остальное
AlSi1Mg <sub>0,8</sub>	6181	0,8-1,2	0,45	0,1	0,15	0,6-1	0,1	0,2	0,1	-	-	0,05	0,15	остальное

Таблица 32

Химический состав алюминиевых деформируемых сплавов по стандарту DIN EN 573-31:1994, Германия, %

Номер сплава	Марка	Основные компоненты								Прочие элементы		Al, не менее
		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	в отдельности	в сумме	
Серия 6000 - сплавы системы Al-Mg-Si												
EN AW 6012	EN AW-AlMgSiPb	0,6-1,4	0,5	0,1	0,4-1	0,6-1,2	0,3	0,3	0,2	0,05	0,15	остальное
EN AW 6013	ENAW-AlMg1Si0,8CuMn	0,6-1	0,5	0,6-1,1	0,2-0,8	0,8-1,2	0,1	0,25	0,1	0,05	0,15	остальное
EN AW 6015	EN AW-AlMg1Si0,3Cu	0,2-0,4	0,1-0,3	0,1-0,25	0,1	0,8-1,1	0,1	0,1	0,1	0,05	0,15	остальное
EN AW 6018	ENAW-AlMg1SiPbMn	0,5-1,2	0,7	0,15-0,4	0,3-0,8	0,6-1,2	0,1	0,3	0,2	0,05	0,15	остальное
EN AW 6351	ENAW-AlSi1Mg0,5Mn	0,7-1,3	0,5	0,1	0,4-0,8	0,4-0,8	-	0,2	0,2	0,05	0,15	остальное
ENAW6351A	ENAW-AlSi1Mg0,5Mn(A)	0,7-1,3	0,5	0,1	0,4-0,8	0,4-0,8	-	0,2	0,2	0,05	0,15	остальное
EN A W 6951	EN AW-AlMgSi0,3Cu	0,2-0,5	0,8	0,15-0,4	0,1	0,4-0,8	-	0,2	-	0,05	0,15	остальное
EN AW 6056	EN AW-AlSi1MgCuMn	0,7-1,3	0,5	0,5-1,1	0,4-1	0,6-1,2	0,25	0,1-0,7	-	0,05	0,15	остальное
EN AW 6060	EN AW-AlMgSi	0,3-0,6	0,1-0,3	0,1	0,1	0,35-0,6	0,05	0,15	0,1	0,05	0,15	остальное
EN AW 6061	EN AW-AlMg1SiCu	0,4-0,8	0,7	0,15-0,4	0,15	0,8-1,2	0,04-0,35	0,25	0,15	0,05	0,15	остальное
EN AW 6061A	EN AW-AlMg1SiCu(A)	0,4-0,8	0,7	0,15-0,4	0,15	0,8-1,2	0,04-0,35	0,25	0,15	0,05	0,15	остальное
EN AW 6261	EN AW-AlMg1SiCuMn	0,4-0,7	0,4	0,15-0,4	0,2-0,35	0,7-1	0,1	0,2	0,1	0,05	0,15	остальное
EN AW 6262	EN AW-AlMg1SiPb	0,4-0,8	0,7	0,15-0,4	0,15	0,8-1,2	0,04-0,14	0,25	0,15	0,05	0,15	остальное
EN AW 6063	EN AW-AlMg0,7Si	0,2-0,6	0,35	0,1	0,1	0,45-0,9	0,1	0,1	0,1	0,05	0,15	остальное
EN AW 6063A	EN AW-AlMg0,7Si(A)	0,3-0,6	0,15-0,35	0,1	0,15	0,6-0,9	0,05	0,15	0,1	0,05	0,15	остальное
EN AW 6463	EN AW-AlMg0,7Si(B)	0,2-0,6	0,15	0,2	0,05	0,45-0,9	-	0,05	-	0,05	0,15	остальное
EN AW 6081	EN AW-AlSi0,9MgMn	0,7-1,1	0,5	0,1	0,1-0,45	0,6-1	0,1	0,2	0,15	0,05	0,15	остальное
EN AW 6181	EN AW-AlSi1Mg0,8	0,8-1,2	0,45	0,1	0,15	0,6-1	0,1	0,2	0,1	0,05	0,15	остальное
EN AW 6082	EN AW-AlSi1MgMn	0,7-1,3	0,5	0,1	0,4-1	0,6-1,2	0,25	0,2	0,1	0,05	0,15	остальное
EN AW 6082A	EN AW-AlSi1MgMn(A)	0,7-1,3	0,5	0,1	0,4-1	0,6-1,2	0,25	0,2	0,1	0,05	0,15	остальное

Эти сплавы имеют высокую пластичность и коррозионную стойкость, упрочняются по единому режиму: температура нагрева под закалку 520...530<sup>0</sup>С, температура искусственного старения 160...170<sup>0</sup>С, время выдержки 10...12 ч. Для высоконагруженных деталей, работающих в условиях переменных нагрузок, старение осуществляют при 150...160<sup>0</sup>С. Для достижения максимальной прочности старение полуфабрикатов следует производить не позднее чем через 1 ч после закалки, иначе наблюдается снижение  $\sigma_B$  и  $\sigma_{02}$  на 30...50 МПа [45].

Таблица 33

Химический состав алюминиевых деформируемых сплавов по стандартам JIS, Япония, %

Номер сплава	Легирующие компоненты и примеси									Прочие примеси		Al
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Zr, Zr+Ti, V	Ti	в отдельности	в сумме	
<b>6063</b>	0,2-0,6	0,35	0,1	0,1	0,45-0,9	0,1	0,1	-	0,1	0,05	0,15	остальное
<b>6101</b>	0,3-0,7	0,5	0,1	0,03	0,35-0,8	0,03	0,1	В 0,06	-	0,03	0,1	остальное
<b>6151</b>	0,6-1,2	1	0,35	0,2	0,45-0,8	0,15-0,35	0,25	-	0,15	0,05	0,15	остальное
<b>6051</b>	0,4-0,8	0,7	0,15-0,4	0,15	0,8-1,2	0,04-0,35	0,25	-	0,15	0,05	0,15	остальное

Коррозионная стойкость сплавов высокая; они не склонны к коррозионному растрескиванию под напряжением независимо от состояния материала. Наиболее прочный сплав АВ по коррозионной стойкости уступает сплавам АД31, АД33.

Сплавы этой системы удовлетворительно соединяются точечной, шовной и аргонно-дуговой сваркой. Обрабатываемость резанием в отожженном состоянии неудовлетворительная, в закаленном и состаренном – удовлетворительная.

Сплав АД31 применяют для деталей невысокой прочности, работающих в интервале температур -70...50<sup>0</sup>С, от которых требуется высокая коррозионная стойкость и хороший декоративный вид. Сплав применяют для отделки кабин самолетов и вертолетов с различными цветовыми покрытиями; используют в строительстве для дверных рам, оконных переплетов, эскалаторов, а также в автомобильной, легкой и мебельной отраслях промышленности. Сплав АД33 применяют для деталей средней прочности, работающих в интервале температур от -70 до 50<sup>0</sup>С и обладающих коррозионной стойкостью во влажной атмосфере и морской воде (лопасти вертолетов, барабаны колес гидросамолетов), а также в судостроении и строительстве.

Небольшие добавки меди в сплавах АВ и АД33 практически полностью находятся в твердом растворе и вследствие этого несколько повышают  $\sigma_B$ , но поскольку они одновременно снижают коррозионную стойкость, сплав АВ обычно выплавляют без меди. Марганец и хром находятся в сплавах в виде дисперсных интерметаллидных фаз, являющихся продуктами распада пересыщенного твердого раствора этих компонентов в Al, образующегося еще в процессе кристаллизации. Эти фазы повышают температуру начала рекристаллизации, способствуют сохранению перекристаллизованной структуры в пресс-изделиях после термообработки, т.е. проявляют при определенных условиях прессования и термообработки пресс-эффект во всех сплавах системы (Al-Mg-Si), кроме АД31, где отсутствуют Mn и Cr [34].

Больше всего сведений о влиянии параметров деформирования на величину сопротивления деформации в литературе представлено для сплавов АД31 и АВ.

Характер степенного упрочнения сплава АД31 при различных исходных состояниях металла показан на рис. 142 [11].

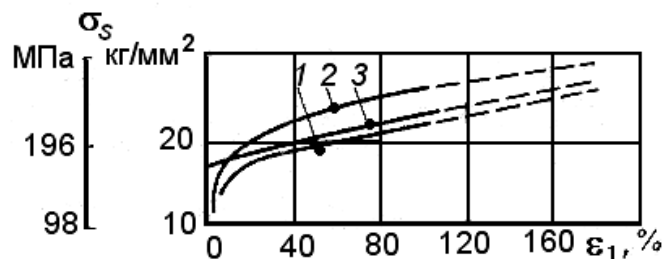


Рис. 142. Кривые упрочнения при сжатии алюминиевого сплава AlMgSi типа АД31: 1 – отожженного; 2 – горячештампованного; 3 – холоднотянутого со степенью обжатия 40 %

Кривые упрочнения при горячей деформации сплава АД31 в различных диапазонах варьирования скорости опубликованы в работах [27] (рис. 143) и [10] (рис. 144 и 145). Испытания на осадку в обоих случаях проводились на кулачковом пластометре.

По опытным данным работы [42] построены графики зависимости сопротивления деформации сплава АД31 в литом состоянии от температуры и скорости деформации и представлены на рис. 146.



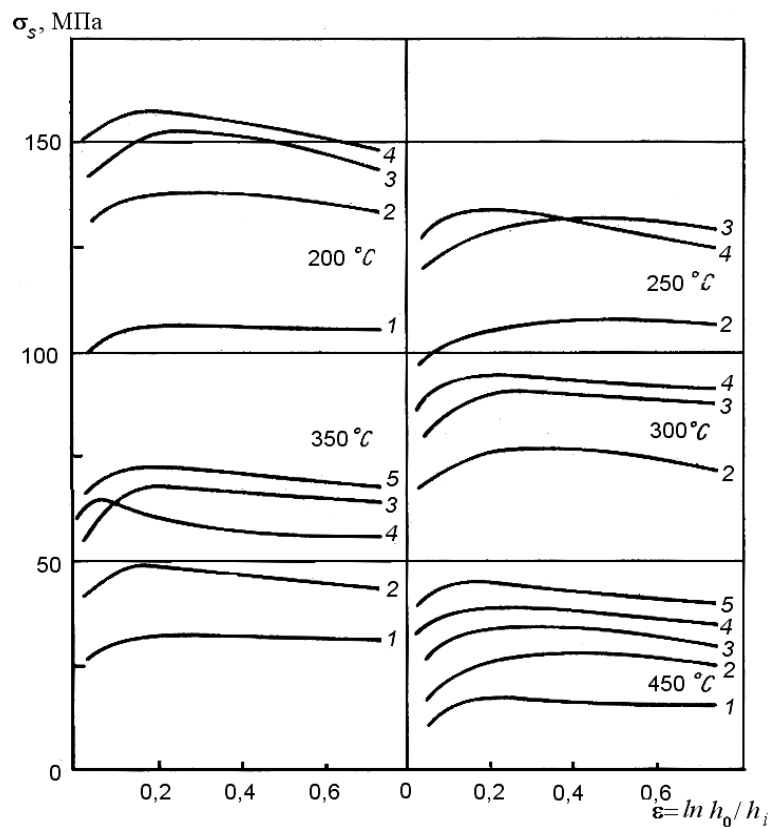


Рис. 143. Кривые испытаний на пластометре сплава АД31:  
 1 –  $\xi = 0,01 \text{ с}^{-1}$ ; 2 –  $\xi = 1 \text{ с}^{-1}$ ; 3 –  $\xi = 10 \text{ с}^{-1}$ ; 4 –  $\xi = 100 \text{ с}^{-1}$

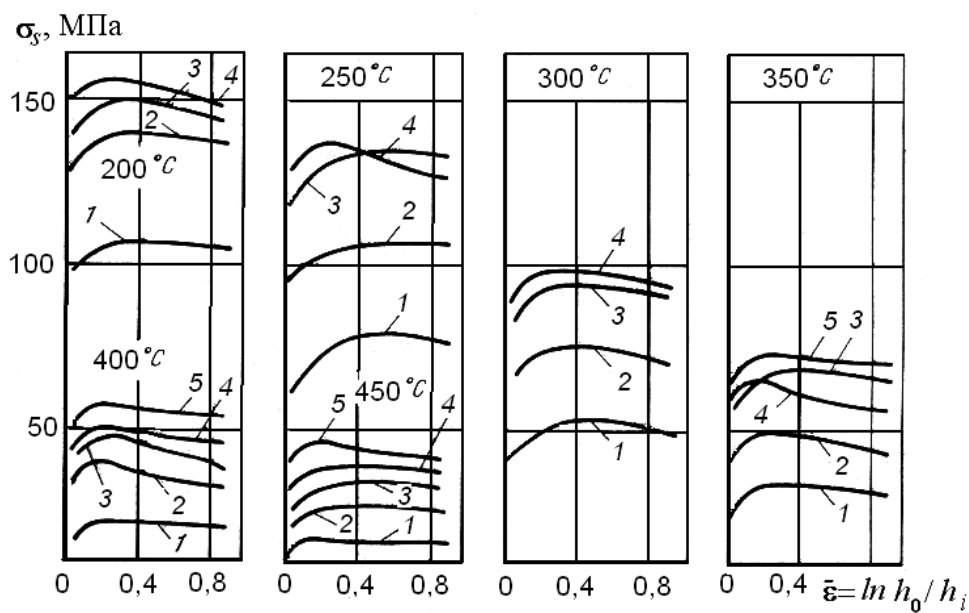


Рис. 144. Кривые деформационного упрочнения сплава АД31 (0,6 % Mg; 0,5 % Si; 98,0 % Al) после горячей прокатки и отжига.  
 Скорость деформации,  $\text{с}^{-1}$ : 1 – 0,01; 2 – 1; 3 – 10; 4 – 100; 5 – 200

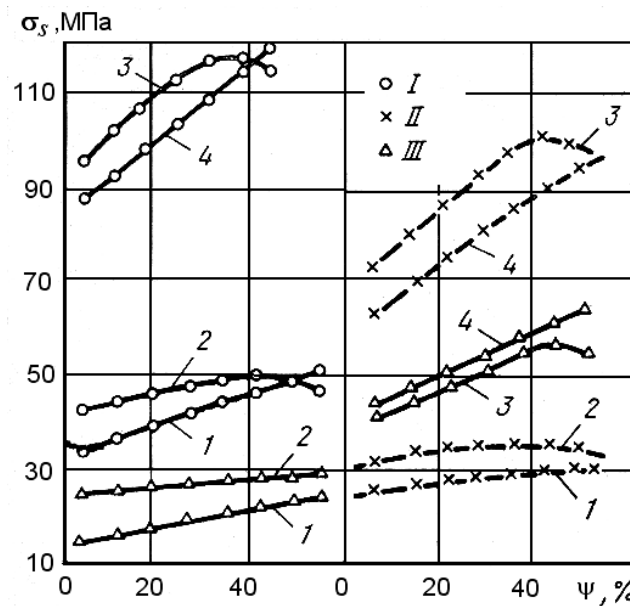


Рис. 145. Кривые деформационного упрочнения сплава АД31 при температурах 360 (I), 420 (II) и 480<sup>0</sup>С (III). Скорость деформации, с<sup>-1</sup>:  
1 – 3·10<sup>-2</sup>; 2 – 14·10<sup>-2</sup>; 3 – 4; 4 – 14

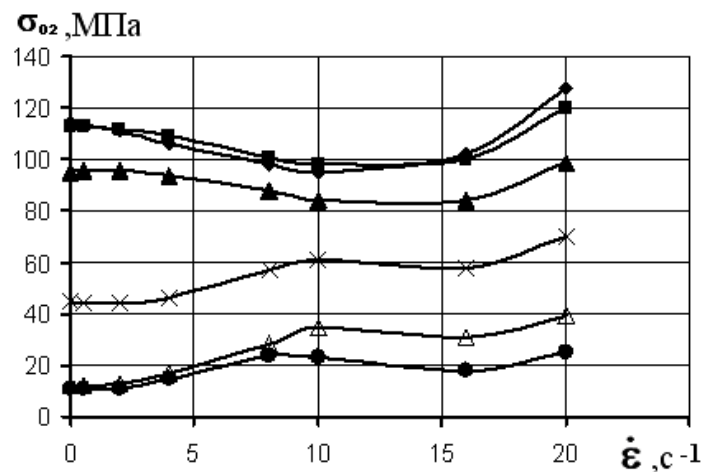


Рис. 146. Сопротивление деформации сплава АД31 в литом состоянии при различных скоростях и температурах деформации:

◆ – 50<sup>0</sup>С; ■ – 150<sup>0</sup>С; ▲ – 250<sup>0</sup>С; х – 350<sup>0</sup>С; Δ – 450<sup>0</sup>С; ● – 500<sup>0</sup>С

Для анализа процессов прессования в работе [38] рекомендована зависимость сопротивления деформации от температуры  $t$  и длительности прессования  $\tau_d$  (время перехода материальной точки через пластическую зону очага обжатия при прямом прессовании), приведенная на рис. 147.



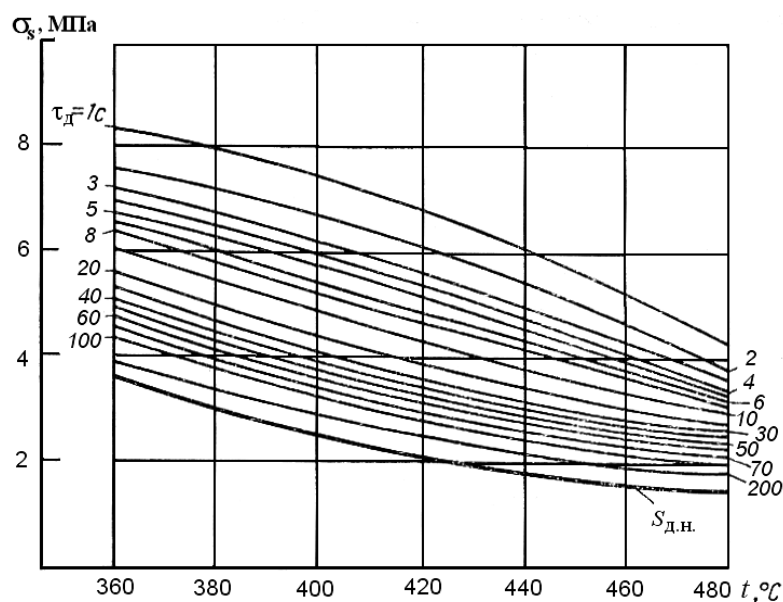


Рис. 147. Зависимость сопротивления деформации сплава АД31 от температуры  $t$  и длительности деформации  $\tau_d$

Для сплавов АД33 и АД35 в книге [13] приведены опытные данные по влиянию скорости и температуры деформации на сопротивление деформации, по которым построены и аппроксимированы кривые упрочнения, приведенные на рис. 148, 149 и 150.

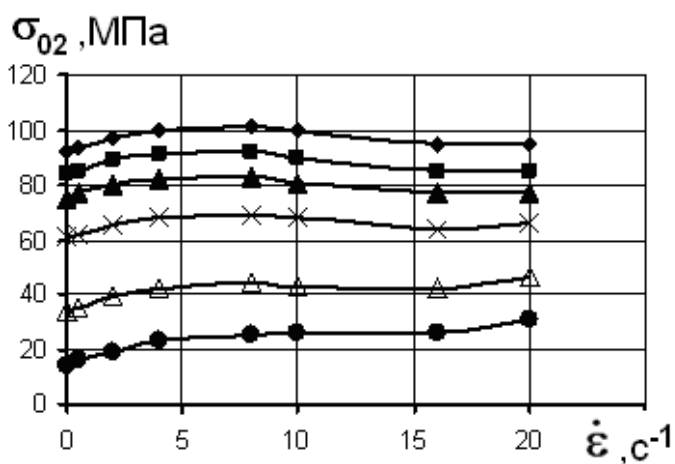


Рис. 148. Сопротивление деформации сплава АД33 в литом состоянии при различных скоростях и температурах деформации:

◆ – 50°C; ■ – 150°C; ▲ – 250°C; x – 350°C; Δ – 450°C; • – 500°C

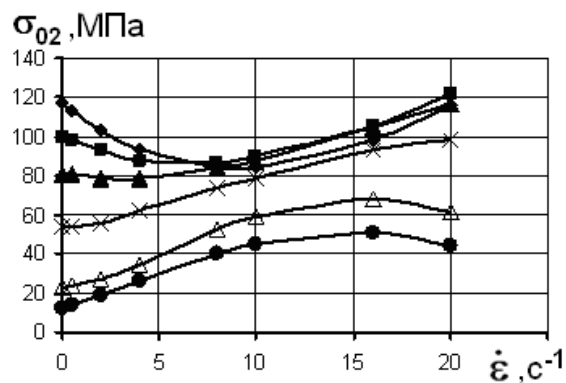


Рис. 149. Сопротивление деформации сплава АД33 в деформированном состоянии при различных скоростях и температурах деформации:

◆ – 50<sup>0</sup>С; ■ – 150<sup>0</sup>С; ▲ – 250<sup>0</sup>С; х – 350<sup>0</sup>С; Δ – 450<sup>0</sup>С; ● – 500<sup>0</sup>С

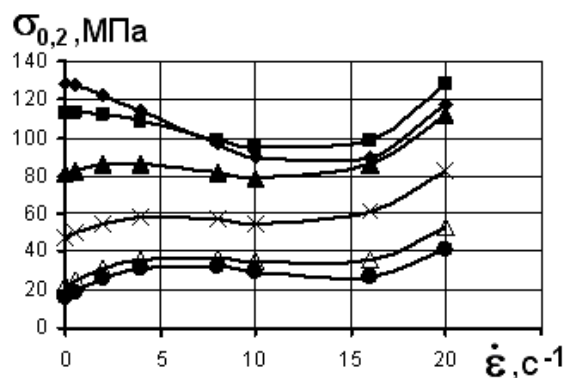


Рис. 150. Сопротивление деформации сплава АД35 в деформированном состоянии при различных скоростях и температурах деформации:

◆ – 50<sup>0</sup>С; ■ – 150<sup>0</sup>С; ▲ – 250<sup>0</sup>С; х – 350<sup>0</sup>С; Δ – 450<sup>0</sup>С; ● – 500<sup>0</sup>С

Аналогичные кривые упрочнения для сплава АВ в литом и деформированном состоянии представлены на рис. 151 и 152.

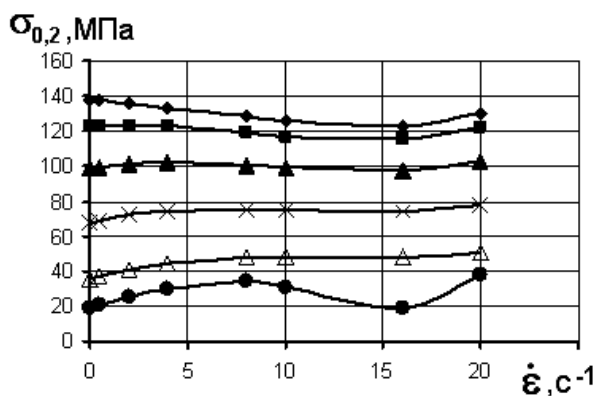


Рис. 151. Сопротивление деформации сплава АВ в литом состоянии при различных скоростях и температурах деформации:

◆ – 50<sup>0</sup>С; ■ – 150<sup>0</sup>С; ▲ – 250<sup>0</sup>С; х – 350<sup>0</sup>С; Δ – 450<sup>0</sup>С; ● – 500<sup>0</sup>С

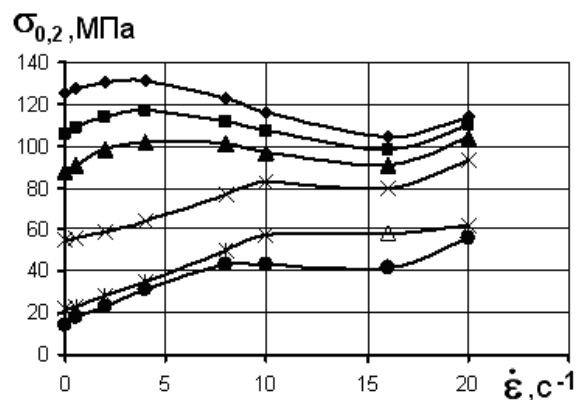


Рис. 152. Сопротивление деформации сплава АВ в деформированном состоянии при различных скоростях и температурах деформирования:

◆ – 50°C; ■ – 150°C; ▲ – 250°C; × – 350°C; Δ – 450°C; ● – 500°C

Зависимости  $\sigma_s = \sigma_s(\varepsilon, t, \dot{\varepsilon})$ , полученные авторами [17] для сплава АВ с различным химическим составом на кулачковом пластометре, приведены на рис. 153 и 154. Кривые упрочнения сплава АВ после закалки и искусственного старения, взятые из книги [27], показаны на рис. 155.

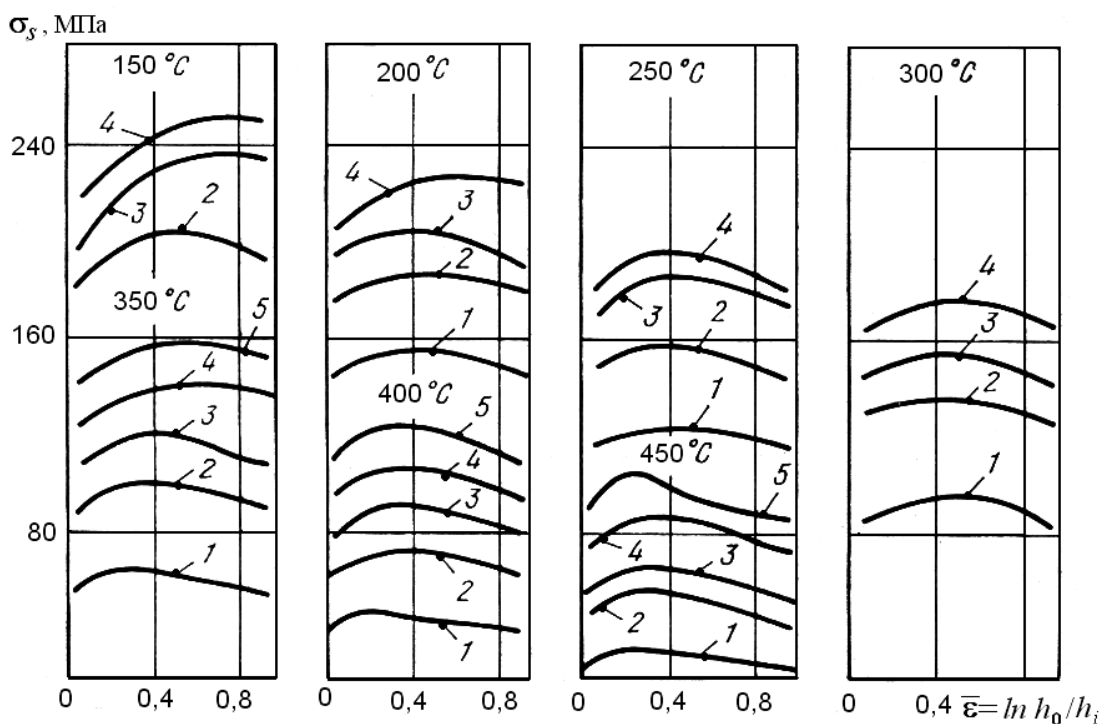


Рис. 153. Кривые деформационного упрочнения сплава АВ (0,4 % Cu; 0,7 % Mg; 0,3 % Mn; 1,1 % Si) после горячего прессования и отжига.

Скорость деформации,  $\text{с}^{-1}$ : 1 – 0,01; 2 – 1; 3 – 10; 4 – 100; 5 – 200

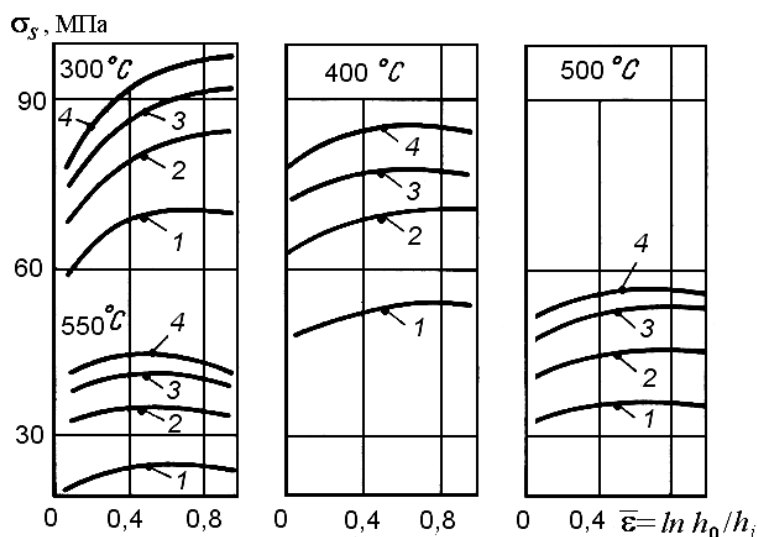


Рис. 154. Кривые деформационного упрочнения сплава АВ (0,07 % Cu; 0,53 % Mn; 0,72 % Mg; 1,03 % Si; 0,36 % Fe).  
Скорость деформации,  $\text{с}^{-1}$ : 1 – 1; 2 – 10; 3 – 20; 4 – 30

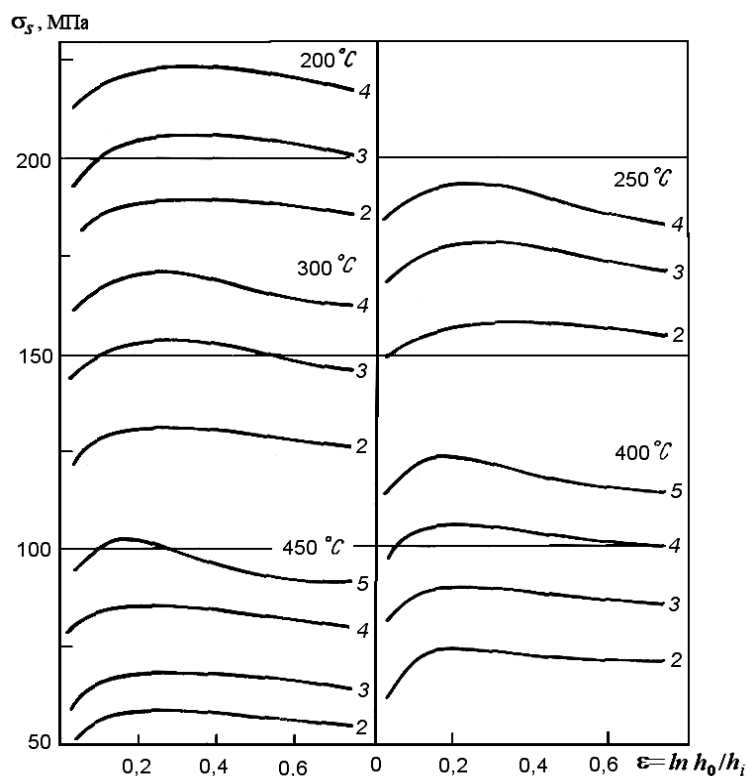


Рис. 155. Кривые испытаний на пластометре сплава АВВ:  
1 –  $\xi = 0,01 \text{ с}^{-1}$ ; 2 –  $\xi = 1 \text{ с}^{-1}$ ; 3 –  $\xi = 10 \text{ с}^{-1}$ ; 4 –  $\xi = 100 \text{ с}^{-1}$ ; 5 –  $\xi = 200 \text{ с}^{-1}$

При анализе процессов прессования удобно использовать кривые упрочнения, полученные при испытаниях на торсионном пластометре при значительных степенях деформации в интервалах изменения температуры и скорости деформации, пригодных для прессования сплавов типа АВ. Кривые упрочнения представлены на рис. 156 [38].

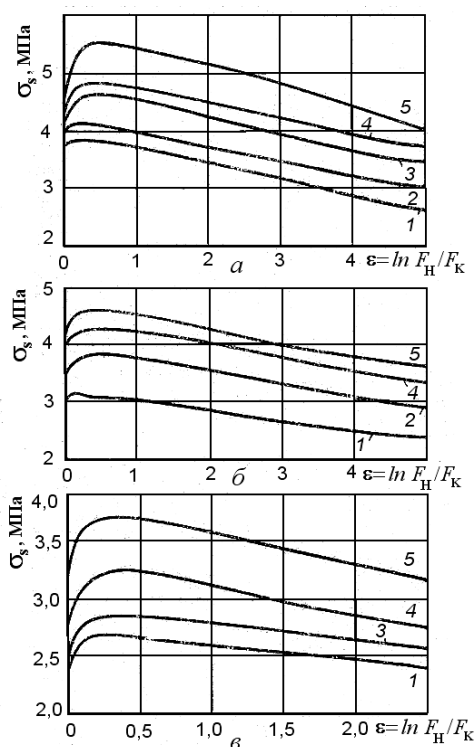


Рис. 156. Зависимость сопротивления деформированию сплава АВ от степени деформации  $\varepsilon$  (испытания на кручение): а – 450°C; б – 500°C; в – 550°C; 1 –  $\dot{\varepsilon}=0,74 \text{ с}^{-1}$ ; 2 –  $1,48 \text{ с}^{-1}$ ; 3 –  $2,96 \text{ с}^{-1}$ ; 4 –  $7,4 \text{ с}^{-1}$ ; 5 –  $10,3 \text{ с}^{-1}$

## 5.8. Сплавы системы Al-Mg-Si-Cu

Сплавы этой системы в основном используются для изготовления поковок, благодаря повышенной прокаливаемости. Марки и химический состав сплавов этой системы по ГОСТ 4784-97 приведены в табл. 34.

Таблица 34

Химический состав сплавов системы (Al-Mg-Si-Cu) по ГОСТ 4784-97

Сплав	Содержание элементов (остальное Al), (мас. %)									
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Другие	Прочие
АК6	0,7-1,2	0,7	1,8-2,6	0,4-0,8	0,4-0,8	-	0,3	0,1	0,1Ni	0,1
АК8	0,5-1,2	0,7	3,9-5,0	0,4-1,0	0,2-0,8	0,1	0,25	0,15	0,2(Ti+Zr)	0,15
1105	3,0	1,5	2,0-5,0	0,3-1,0	0,4-2,0	-	1,0	-	0,2Ni; 0,2(Ti+Cr)	0,2

Зарубежные сплавы, близкие по химическому составу, не выделены в специальную группу и относятся к серии 2000.

По механическим свойствам эти сплавы занимают промежуточное положение между дюралюминами и авиалами. Сплавы АК6, АК8 и 1105 можно рассматривать как авиала с повышенным содержанием меди. Сплав АК8 близок по химическому составу к Д1, но содержит кремний в качестве легирующего компонента; иногда его называют

супердюралюмином. У сплава АК6 хорошо сочетаются прочность и пластичность в горячем и холодном состоянии. Однако он уступает сплаву АК8 по прочности и по свариваемости. Все сплавы этой системы, особенно 1105, имеют низкую коррозионную стойкость.

Сплавы АК6 и АК8 термоупрочняемые и закаливаются с нагрева: АК6 –  $550 \pm 5^\circ\text{C}$ ; АК8 –  $550 \pm 5^\circ\text{C}$ . Рекомендуется искусственное старение при  $160 \dots 170^\circ\text{C}$  в течение  $12 \dots 15$  ч.

В доступных литературных источниках приводятся для сплавов АК6 и АК8 только кривые упрочнения для горячей деформации. Сплав АК6 представлен диаграммами текучести, позаимствованными из [10] (рис. 157) и [42] (рис. 158 и 159). Последние кривые построены по опубликованным табличным данным пластометрических исследований на кулачковом пластометре.

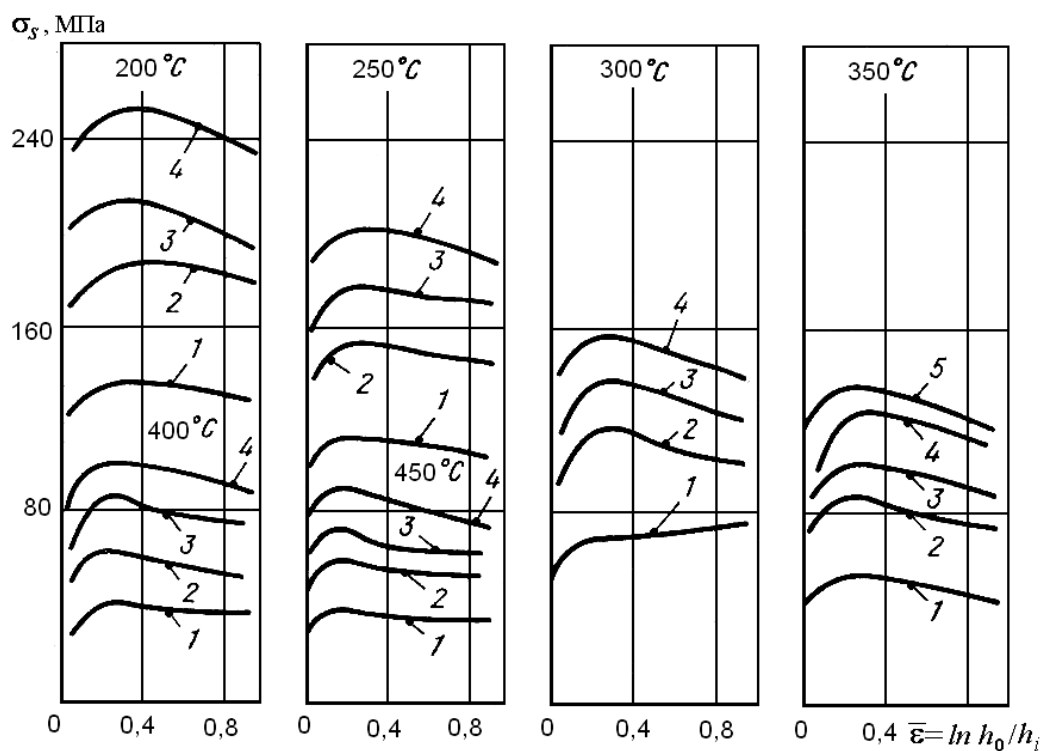


Рис. 157. Кривые деформационного упрочнения сплава АК6 (2,2 % Cu; 0,5 % Mg; 0,7 % Mn; 1,1 % Si) после горячего прессования и отжига.

Скорость деформации,  $\text{с}^{-1}$ : 1 –  $10^{-2}$ ; 2 – 1; 3 – 10; 4 – 100; 5 – 200

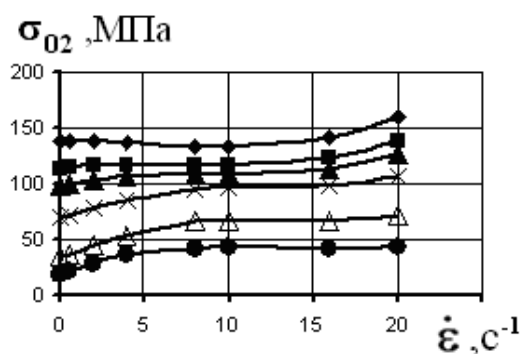


Рис. 158. Сопротивление деформации, МПа, сплава АК6 в литом состоянии при различных скоростях и температурах деформации:

◆ – 50<sup>0</sup>С; ■ – 150<sup>0</sup>С; ▲ – 250<sup>0</sup>С; х – 350<sup>0</sup>С; Δ – 450<sup>0</sup>С; • – 500<sup>0</sup>С

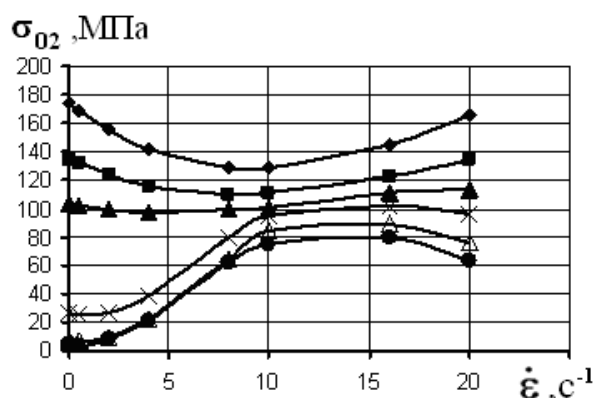


Рис. 159. Сопротивление деформации, МПа, сплава АК6 в деформированном состоянии при различных скоростях и температурах деформации:

◆ – 50<sup>0</sup>С; ■ – 150<sup>0</sup>С; ▲ – 250<sup>0</sup>С; х – 350<sup>0</sup>С; Δ – 450<sup>0</sup>С; • – 500<sup>0</sup>С

Зависимость сопротивления деформации от  $\varepsilon$  и  $t$  в диапазоне скоростей деформации, характеризующих процессы прессовойковки и штамповки, представлена на рис. 160 по данным [39].

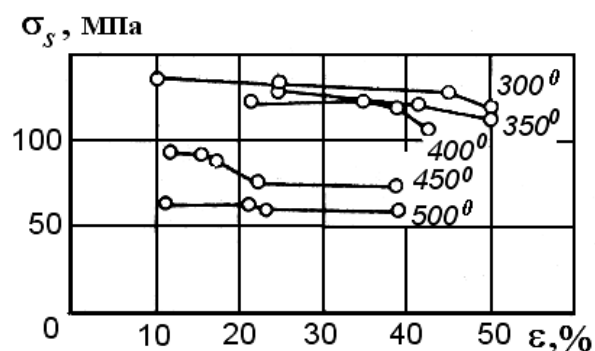


Рис. 160. Кривые течения алюминиевого сплава АК6

Кривые упрочнения сплава АК8, полученные авторами [10] при горячей осадке на кулачковом пластометре для различных диапазонов изменения скорости деформации, представлены на рис. 161 и 162, а при испытаниях на плоское сжатие – на рис. 163.

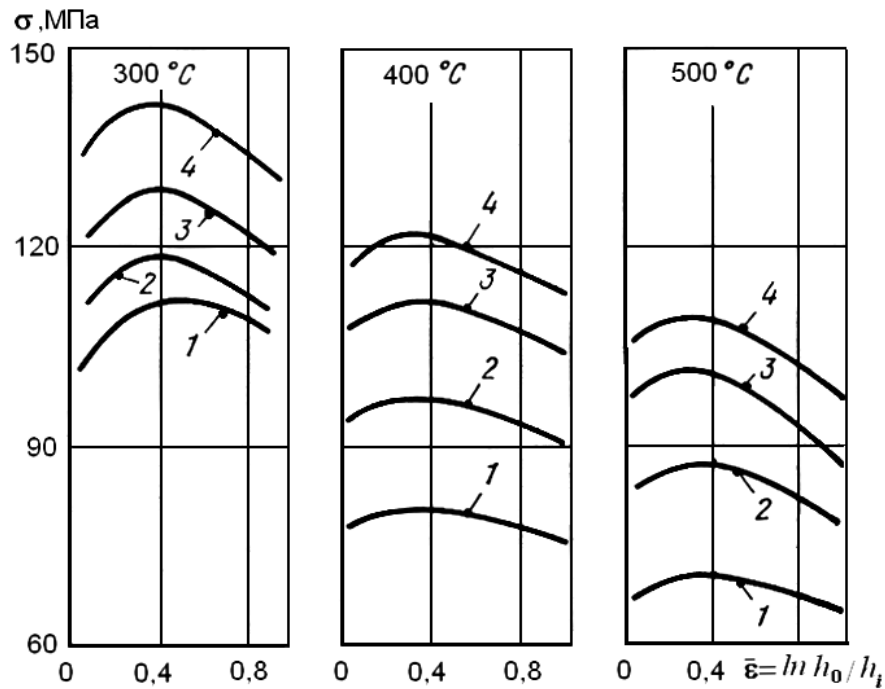


Рис. 161. Кривые деформационного упрочнения сплава АК8 (4,40 % Cu; 0,80 % Mn; 0,56 % Mg; 0,90 % Si; 0,36 % Fe). Скорость деформации,  $\text{с}^{-1}$ : 1 – 1; 2 – 10; 3 – 20; 4 – 30

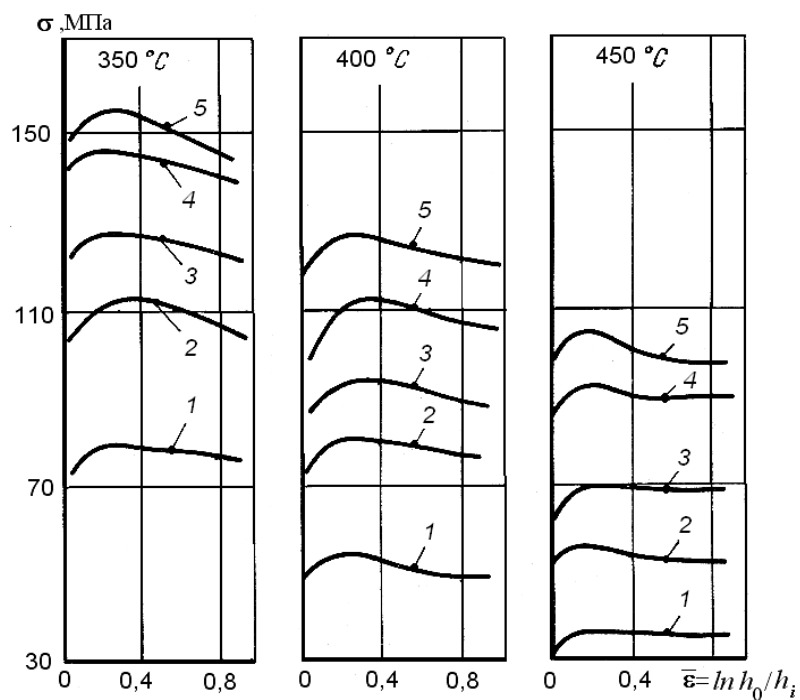


Рис. 162. Кривые деформационного упрочнения сплава АК8 (4,5 % Cu; 0,4 % Mg; 0,8 % Mn; 1,1 % Si; 92,4 % Al) после горячего прессования и отжига. Скорость деформации,  $\text{с}^{-1}$ : 1 –  $10^{-2}$ ; 2 – 1; 3 – 10; 4 – 100; 5 – 200



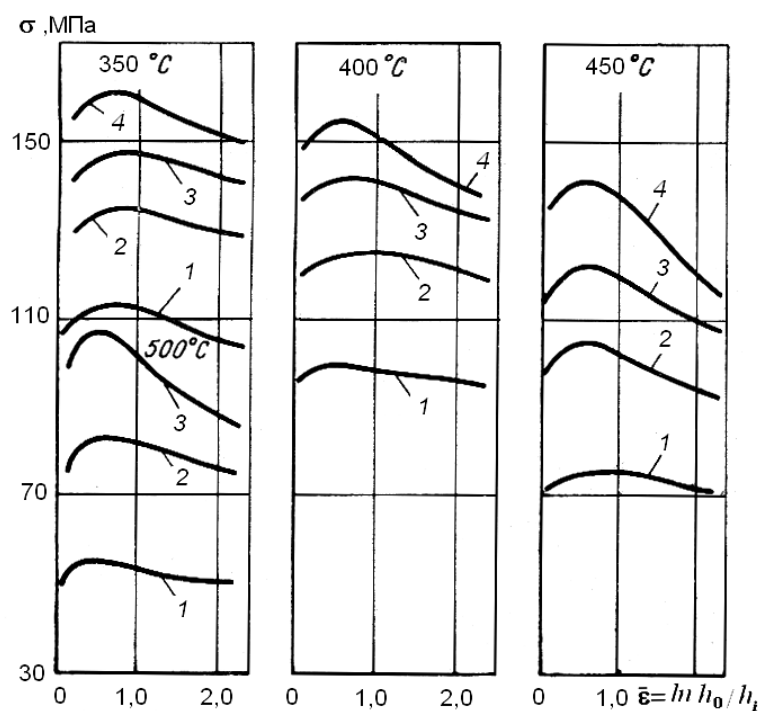


Рис. 163. Кривые испытаний сплава АК8 на плоское сжатие (4,17% Cu; 0,89 % Mg; 0,68 % Si; 0,41 % Fe; 0,80 % Mn; 92,8 % Al). Скорость деформации,  $\text{с}^{-1}$ : 1 – 0,4; 2 – 9; 3 – 101; 4 – 311

По результатам пластометрических исследований на горячую осадку на кулачковом пластометре конструкции УЗТМ при двух степенях деформации  $\varepsilon = \Delta h/h_0 \cdot 100\%$  опубликованы кривые упрочнения сплава АК8 в справочнике [25] и представлены на рис. 164. Для этого же сплава на рис. 165 и 166 даны зависимости  $\sigma_{02}$  от температуры и скорости деформации, построенные по данным авторов [13 и 42] и аппроксимированные полиномом третьей степени с достаточно высокой точностью. Зависимости  $\sigma_{02} = \sigma_{02}(t, \dot{\varepsilon})$  получены испытаниями на растяжение на кулачковом пластометре (рис. 28) без учета реализуемой степени деформации.

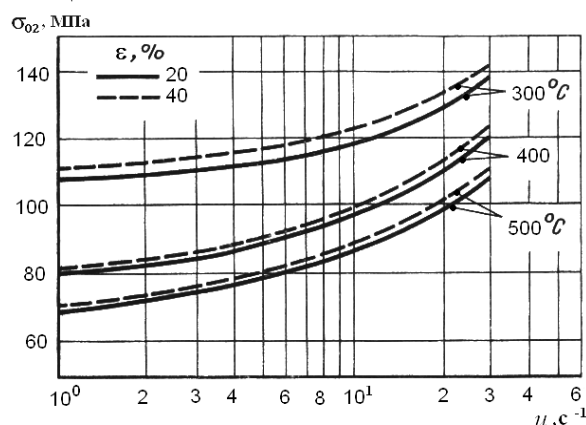


Рис. 164. Сопротивление деформации сплава типа АК8 (4,4 % Cu; 0,80 % Mn; 0,55 % Mg; 0,90 % Si; 0,38 % Fe; ост. Al)

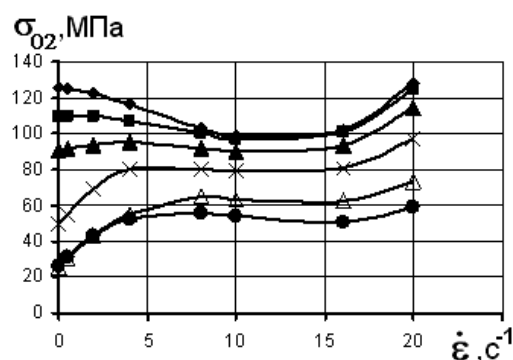


Рис. 165. Сопротивление деформации, МПа, сплава АК8 в литом состоянии при различных скоростях и температурах деформации:

◆ – 50<sup>0</sup>С; ■ – 150<sup>0</sup>С; ▲ – 250<sup>0</sup>С; х – 350<sup>0</sup>С; Δ – 450<sup>0</sup>С; ● – 500<sup>0</sup>С

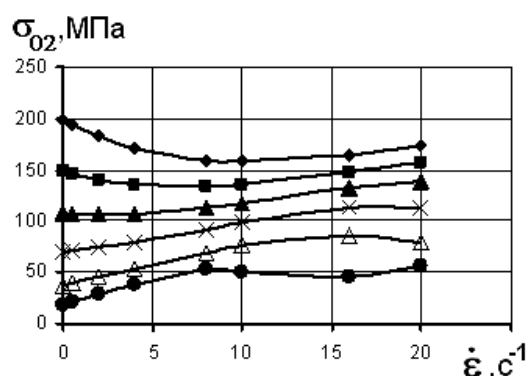


Рис. 166. Сопротивление деформации, МПа, сплава АК8 в деформированном состоянии при различных скоростях и температурах деформации:

◆ – 50<sup>0</sup>С; ■ – 150<sup>0</sup>С; ▲ – 250<sup>0</sup>С; х – 350<sup>0</sup>С; Δ – 450<sup>0</sup>С; ● – 500<sup>0</sup>С

### 5.9. Сплавы системы Al-Cu-Mg с добавлением железа и никеля [34]

В сплавах этой системы упрочнение, так же как и у дюралюминов, достигается за счет меди и магния. Добавки железа и никеля не меняют механические свойства при комнатной температуре, но способствуют повышению пластичности при горячей обработке сплавов. Наибольший эффект достигается при соотношении концентрации Fe и Ni 1:1. Титан, если он вводится в сплав, играет роль модификатора.

Химический состав отечественных и зарубежных сплавов этой системы приведен в табл. 35.

Сплав АК4-1 закаливается с нагрева до 530±5<sup>0</sup>С в холодной или горячей воде и искусственно старится при 190...200<sup>0</sup>С в течение 12...24 ч. Сплав после такой термической обработки приобретает рекристаллизованную структуру. Следует учитывать, что Fe и Ni хотя и повышают температуру начала рекристаллизации, но не в такой степени, чтобы при горячей деформации проявлялся пресс-эффект.

Таблица 35

## Химический состав алюминиевых сплавов по ГОСТ 4784-97, %

Марка сплава	Цифровое обозначение	Al, не менее	Массовая доля элементов, %										Прочие примеси		
			Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Другие элементы		Каждая	Сумма	
AK4	1140	остальное	0,5-1,2	0,8-1,3	1,9-2,5	0,2	1,4-1,8	-	0,3	0,1	Ni 0,8-1,3		0,05	0,1	
AK4-1	1141	остальное	0,35	0,8-1,4	1,9-2,7	0,2	1,2-1,8	0,1	0,3	0,02-0,1	Ni 0,8-1,4		0,05	0,1	
AK4-1ч	-	остальное	0,1-0,25	0,9-1,3	1,9-2,7	-	1,3-1,8	-	0,1	0,02-0,1	Ni 0,9-1,2		0,05	0,15	
Стандарт DIN EN 573-31:1994, Германия, %															
Номер сплава	Марка	Основные компоненты											Прочие элементы		Al, не менее
		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ga	V	Ti	в отдельности	в сумме	
ENAW2618A	ENAW-AlCu2Mg,5Ni	0,15-0,25	0,9-1,4	1,8-2,7	0,25	1,2-1,8	-	0,8-1,4	0,15	-	-	0,2	0,05	0,15	остальное
EN AW 2031	ENAW-AlCu2,5NiMg	0,5-1,3	0,6-1,2	1,8-2,8	0,5	0,6-1,2	-	0,6-1,4	0,2	-	-	0,2	0,05	0,15	остальное
Стандарт JIS, Япония, %															
Номер сплава	Легирующие компоненты и примеси									Прочие примеси		Al			
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Zr, Zr+Ti, V	Ti	в отдельности	в сумме				
2018	0,9	1	3,5-4,5	0,2	0,45-0,9	0,1	0,25	Ni 1,7-2,3	-	0,05	0,15	остальное			
2218	0,9	1	3,5-4,5	0,2	1,2-1,8	0,1	0,25	Ni 1,7-2,3	-	0,05	0,15	остальное			
2618	0,1-0,25	0,9-1,3	1,9-2,7	-	1,3-1,8	-	0,1	Ni 0,9-1,2	0,04-0,1	0,05	0,15	остальное			

При температурах 250...300<sup>0</sup>С сплавы типа АК4-1 являются наиболее прочными среди всех других сплавов рассмотренных систем и успешно конкурируют с жаропрочными сплавами Д20 и 1201. Сплав АК4 имеет характеристики, близкие к АК4-1, и отличается от него повышенным содержанием кремния, что ухудшает его свариваемость.

Долгое время сплавы этой системы рассматривались как ковочные, но в настоящее время широко используются для производства листов в авиастроении. Эти сплавы превосходят дюралюмины по длительной прочности и меньшей склонности к ползучести. При изготовлении листов, предназначенных для длительной работы при температурах 130...150<sup>0</sup>С, регламентируется размер зерна 30...50 мкм. Это достигается нагревом под закалку непосредственно после холодной пластической обработки. Иногда для получения требуемой зеренной структуры листы сначала отжигают при 350...370<sup>0</sup>С, а затем закаливают (рис. 167 [46]).

Коррозионная стойкость сплавов типа АК4-1 мала, кроме того, они склонны к межкристаллитной коррозии, что требует применения либо защитной плакировки, либо анодирования.

Нестандартизованный, разработанный в ВИАМе сплав АК4-2 отличается пониженным содержанием Fe и Ni и добавками циркония. Это дает возможность без снижения жаропрочности увеличить вязкость разрушения.

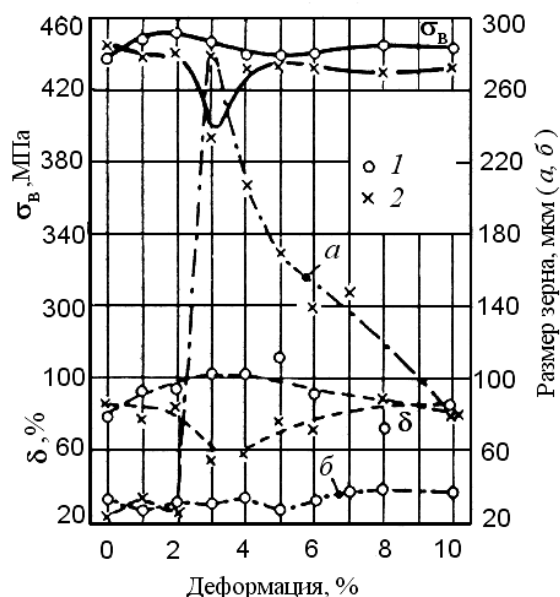


Рис. 167. Влияние деформации перед закалкой на механические свойства и величину зерна листов из сплава АК4-1, предварительно отожженных при температурах 300<sup>0</sup>С (1) и 400<sup>0</sup>С (2)

Сопротивление деформации сплавов системы (Al-Cu-Mg-Fe-Ni) до настоящего времени изучено слабо. В работе [11] приведены кривые степенного упрочнения сплавов АК4-1 и АК4-2 при различном исходном состоянии металла (рис.168, 169); а данные по влиянию на  $\sigma_s$  степени деформации, температуры и скорости деформации, полученные в испытаниях на кручение на торсионном пластометре представлены в справочниках [10 и 17] и показаны на рис. 170. Применительно к процессам горячейковки и прессовой штамповки полезен график зависимости  $\sigma_s = \sigma_s(\epsilon, t)$ , полученный авторами [39] для сплава АК4 (рис. 171).

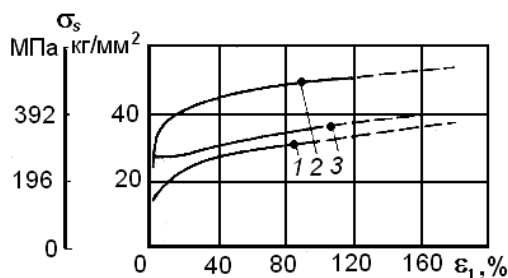


Рис. 168. Кривые упрочнения при сжатии алюминиевого сплава AlCuMg (АК4-1 нормальной прочности): 1 – отожженного; 2 – горячештампованного; 3 – холоднотянутого со степенью обжатия 40 %

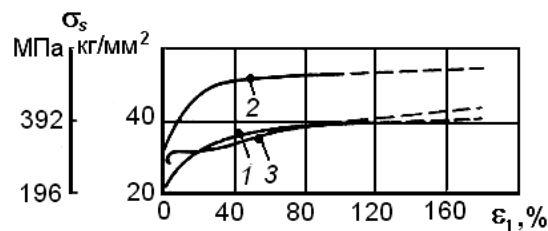


Рис. 169. Кривые упрочнения при сжатии алюминиевого сплава AlCuMg (АК4-2 повышенной прочности): 1 – отожженного; 2 – горячештампованного; 3 – холоднотянутого со степенью обжатия 40 %

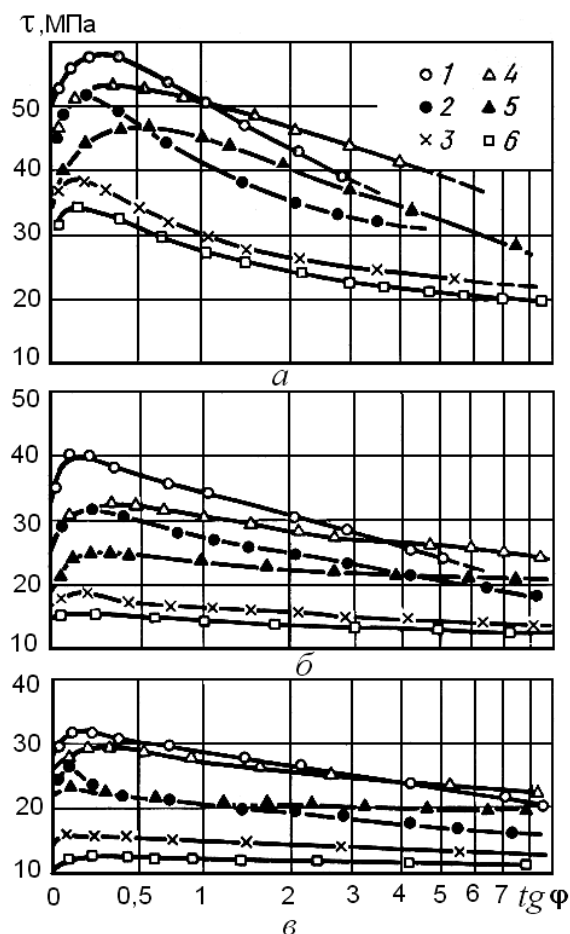


Рис. 170. Кривые испытаний на кручение сплава АК4-1 в литом (1-3) и деформированном (4-6) состояниях при 350 (а), 400 (б) и 450 С<sup>0</sup> (в).  
Скорость деформации, с<sup>-1</sup>: 1,4 – 0,35; 2,5 – 0,07; 3,6 – 0,007

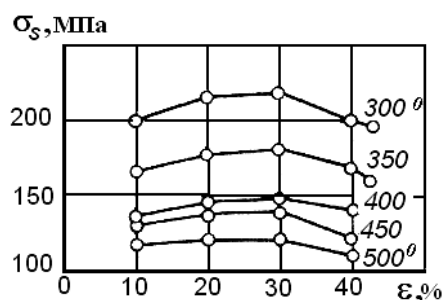


Рис. 171. Кривые течения алюминиевого сплава АК4

## 5.10. Сплавы системы Al-Zn-Mg

Сплавы системы также относятся к термоупрочняемым, при этом пересыщенный твердый раствор в этих сплавах может быть получен при сравнительно малых скоростях охлаждения (например, на воздухе). Это сплавы, несмотря на добавки переходных металлов (Mn, Cr, Zr) и оптимизацию режимов термической обработки, проявляют низкую стойкость против коррозии под напряжением, особенно

если содержание (Zr+Mg) превосходит 6 %. Отечественные сплавы по химическому составу соответствуют стандарту ГОСТ 4784-97 (табл. 36).

Таблица 36

Химический состав сплавов системы (Al-Zn-Mg) по ГОСТ 4784-97

Сплав	Содержание элементов (остальное Al), мас. %									
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Другие	Прочие
1915	0,35	0,4	0,1	0,2-0,7	1,0-1,8	0,06-0,20	4,0-5,0	0,01-0,06	0,08-0,20 Zr	0,5
1925	0,7	0,7	0,8	0,2-0,7	1,3-1,8	0,2	3,4-4,0	0,1	0,1-0,2 Zr	0,10

Химический состав сплавов этой системы по зарубежным стандартам приведен в табл. 37.

Таблица 37

Химический состав алюминиевых деформируемых сплавов системы (Al-Zr-Mg) по ISO 209-1:1989E, % не более

Марка сплава	Номер**	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Zr	Примечания	Прочие		Al
												Каждый	Всего	
AlZn4Mg1,5Mn	-	0,3	0,4	0,1	0,2-0,6	1,3-1,8	0,08-0,2	3,4-4	0,1	0,15-0,22	-	0,05	0,15	остальное
AlZn4,5Mg1	7020	0,35	0,4	0,2	0,05-0,5	1-1,4	0,1-0,35	5,7-6,7		0,08-0,2	Ti+Zr 0,08-0,25	0,05	0,15	остальное
AlZn4,5Mg1,5Mn	7005	0,35	0,4	0,1	0,2-0,7	1-1,8	0,06-0,2	5,7-6,7	0,01-0,06	0,08-0,2	-	0,05	0,15	остальное

Стандарт DIN EN 573-31:1994, Германия, %

Номер сплава	Марка	Основные компоненты									Прочие элементы		Al, не менее
		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti		в отдельности	в сумме	
EN AW 7003	EN AW-AlZn6Mg0,8Zr	0,3	0,35	0,2	0,3	0,5-1	0,2	5-6,5	0,2		0,05	0,15	остальное
EN AW 7005	ENAW-AlZn4,5Mg1,5Mn	0,35	0,4	0,1	0,2-0,7	1-1,8	0,06-0,2	4-5	0,01-0,06		0,05	0,15	остальное
EN AW 7108	ENAW-AlZn5Mg1Zr	0,1	0,1	0,05	0,05	0,7-1,4	-	4,5-5,5	0,05		0,05	0,15	остальное

Номер сплава	Марка	Основные компоненты											Прочие элементы		Al, не менее
		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ga	V	Ti	в отдельности	в сумме	
EN AW 7015	EN AW-AlZn5Mg1,5CuZr	0,2	0,3	0,06-0,15	0,1	1,3-2,1	0,15	-	4,6-5,2	-	-	0,1	0,05	0,15	остальное
EN AW 7016	EN AW-AlZn4,5MgCu	0,1	0,12	0,45-1	0,03	0,8-1,4	-	-	4-5	-	0,05	0,03	0,03	0,1	остальное
EN AW 7116	ENAW-AlZn4,5Mg1Cu0,8	0,15	0,3	0,5-1,1	0,05	0,8-1,4	-	-	4,5-5,2	0,03	0,03	0,05	0,05	0,15	остальное
EN AW 7020	EN AW-AlZn4,5Mg1	0,35	0,4	0,2	0,05-0,5	1-1,4	0,1-0,35	-	4-5	-	-	-	0,05	0,15	остальное
EN AW 7021	ENAW-AlZn5,5Mg1,5	0,25	0,4	0,25	0,1	1,2-1,8	0,05	-	5-6	-	-	0,1	0,05	0,15	остальное
EN AW 7022	EN AW-AlZn5Mg3Cu	0,5	0,5	0,5-1	0,1-0,4	2,6-3,7	0,1-0,3	-	4,3-5,2	-	-	-	0,05	0,15	остальное
EN AW 7026	ENAW-AlZn5Mg1,5Cu	0,08	0,12	0,6-0,9	0,05-0,2	1,5-1,9	-	-	4,6-5,2	-	-	0,05	0,03	0,1	остальное
EN AW 7029	EN AW-AlZn4,5Mg1,5Cu	0,1	0,12	0,5-0,9	0,03	1,3-2	-	-	4,5-5,2	-	0,05	0,05	0,03	0,1	остальное
EN AW 7129	EN AW-AlZn4,5Mg1,5Cu (A)	0,15	0,3	0,5-0,9	0,1	1,3-2	0,1	-	4,5-5,2	0,03	0,05	0,05	0,05	0,15	остальное
EN AW 7030	EN AW-AlZn5,5Mg1Cu	0,2	0,3	0,2-0,4	0,05	1-1,5	0,04	-	4,8-5,9	0,03	-	0,03	0,05	0,15	остальное
EN AW 7039	EN AW-AlZn4Mg3	0,3	0,4	0,1	0,1-0,4	2,3-3,3	0,15-0,25	-	3,5-4,5	-	-	0,1	0,05	0,15	остальное

Стандарт JIS, Япония, %

Номер сплава	Легирующие компоненты и примеси										Прочие примеси		Al
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Zr, Zr+Ti, V	Ti		в отдельности	в сумме	
7003	0,3	0,35	0,2	0,3	0,5-1	0,2	5-6,5	Zr 0,05-0,25	0,2		0,05	0,15	остальное
7N01	0,3	0,35	0,2	0,2-0,7	1-2	0,3	4-5	V 0,1; Zr 0,25	0,2		0,05	0,15	остальное

Механические коррозионные свойства сплава 1915 зависят во многом от дисперсности циркониевой интерметаллидной фазы, что определяется условиями гомогенизационного отжига. Может быть



подобран такой режим, при котором эти свойства существенно улучшаются. Сплав 1915 закаливается с температуры  $450 \pm 10^\circ\text{C}$ . Нагрев выше этой температуры хотя и не приводит к пережогу, но снижает коррозионную стойкость. При естественном старении в течение месяца пластичность сплава снижается мало, хотя прирост прочности и твердости аналогичен дюралюминам. Искусственное старение, обеспечивающее более высокий предел текучести и коррозионную стойкость, рекомендуется проводить по режиму:  $100^\circ\text{C}$  в течение 10...24 ч, затем  $175^\circ\text{C}$  в течение 3...5 ч. Этот сплав, в отличие от 1925, используется для сварных конструкций. Из-за высокого содержания меди сплав 1925 плохо сваривается. После закалки и искусственного старения по тем же режимам, что и 1915, сплав приобретает приблизительно те же свойства.

Представляет практический интерес новый сплав этой системы с добавками скандия 01970. Он рекомендован для всех видов полуфабрикатов поскольку по прочности, свариваемости, коррозионной стойкости превосходит все другие термоупрочняемые свариваемые сплавы алюминия. Точный химический состав этого сплава не публикуется в открытой печати и является интеллектуальной собственностью ВИЛСа.

Влияние температуры, степени и скорости деформации на сопротивление деформации сплава 1915, определенное пластометрическими испытаниями на сжатие и растяжение на кулачковом пластометре, отображено на графиках на рис. 172 [10, 17].

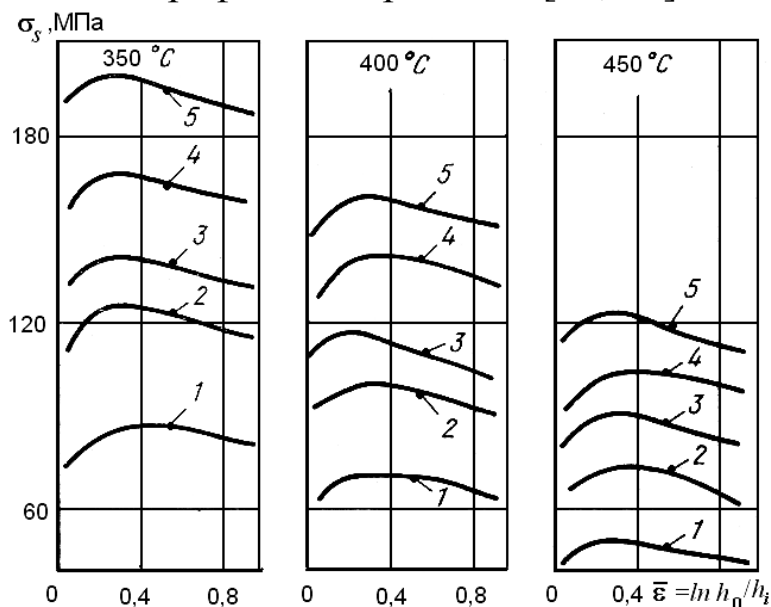


Рис. 172. Кривые деформационного упрочнения алюминиевого сплава 1915 (1,5 % Mg; 0,4 % Mn; 3,8 % Zn; 93,0 % Al).

Скорость деформации, с<sup>-1</sup>: 1 – 0,001; 2 – 1; 3 – 10; 4 – 100; 5 – 200

В исследованиях Микляева П.Г. [13, 42] оценивалось влияние на  $\sigma_{02}$  температуры и скорости деформации без учета степени деформации при испытаниях на растяжение. В справочнике [13] приведены табличные данные, по которым построены кривые упрочнения сплава 1915 в литом и деформированном состояниях (рис. 173 и 174) и сплава 1911 (рис. 175), который также отнесен к данной системе алюминиевых сплавов. Приводится объемная диаграмма зависимости сопротивления деформации сдвига  $\tau_{ср}^{02}$  от скорости сдвига при срезе и от температуры испытания (рис. 176).

Для анализа процессов горячего прессования вполне пригодны зависимости  $\sigma_s$  от температуры и длительности деформации при прямом способе прессования  $\tau_d$ , опубликованные в работе [38] и представленные здесь на рис. 177. Подобные зависимости для сплавов 01915 и 01925 представлены также в книге [47].

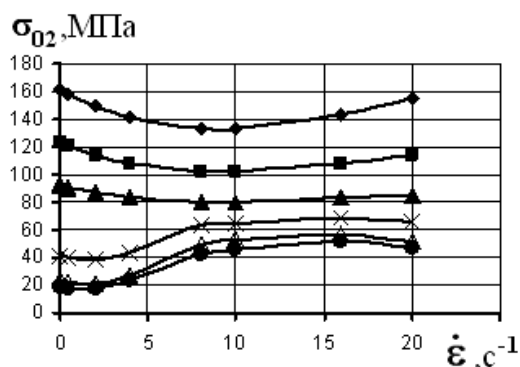


Рис. 173. Сопротивление деформации, МПа, сплава 1915 в литом состоянии при различных скоростях и температурах деформации:

◆ – 50°C; ■ – 150°C; ▲ – 250°C; х – 350°C; Δ – 450°C; • – 500°C

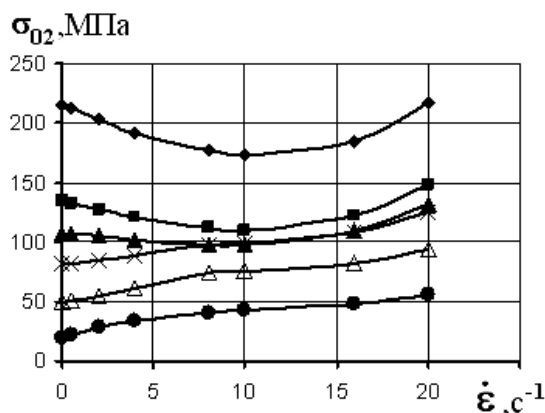


Рис. 174. Сопротивление деформации, МПа, сплава 1915 в деформированном состоянии при различных скоростях и температурах деформации:

◆ – 50°C; ■ – 150°C; ▲ – 250°C; х – 350°C; Δ – 450°C; • – 500°C



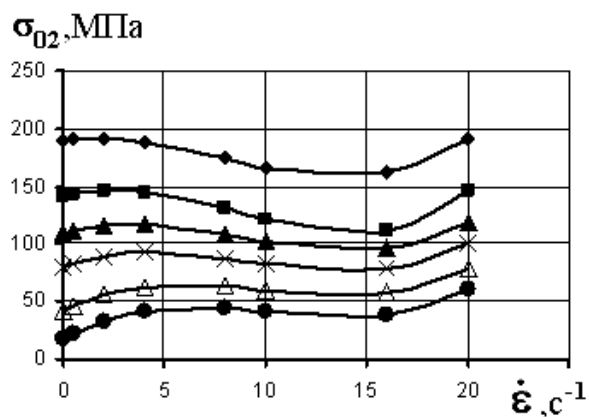


Рис. 175. Сопротивление деформации, МПа, сплава 1911 в литом состоянии при различных скоростях и температурах деформации:  $\blacklozenge$  –  $50^{\circ}\text{C}$ ;  $\blacksquare$  –  $150^{\circ}\text{C}$ ;  $\blacktriangle$  –  $250^{\circ}\text{C}$ ;  $\times$  –  $350^{\circ}\text{C}$ ;  $\triangle$  –  $450^{\circ}\text{C}$ ;  $\bullet$  –  $500^{\circ}\text{C}$

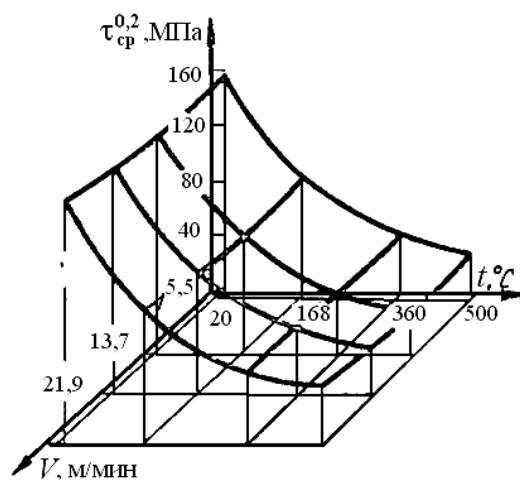


Рис. 176. Зависимость предела текучести при срезе сплава 1915 в литом состоянии от температуры и скорости деформации

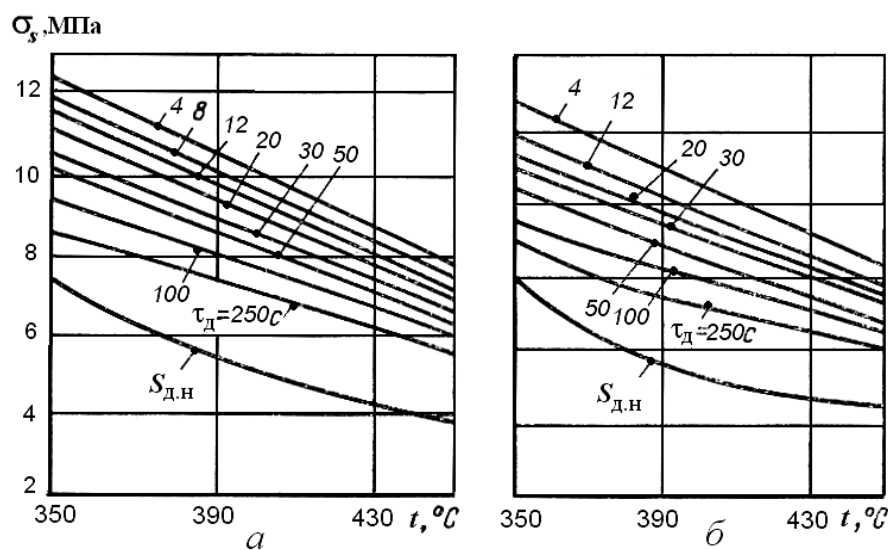


Рис. 177. Зависимость сопротивления деформированию  $\sigma_s$  сплавов 1915 (а) и 1925 (б) от температуры  $t$  и длительности деформации  $\tau_d$

### 5.11. Сплавы системы Al-Zn-Mg-Cu

Высокопрочные сплавы этой системы имеют высокое временное сопротивление ( $\sigma_b = 600 \dots 700$  МПа) и близкий к нему по значениям предел текучести. Они не являются теплопрочными, и при длительной эксплуатации их можно использовать до температур не выше  $100-120^\circ\text{C}$  [45]. Химический состав сплавов этой системы в соответствии с ГОСТ4784-97 представлен в табл. 38.

Химический состав сплавов этой системы по зарубежным стандартам приведен в табл. 39.

Таблица 38

Среднее содержание легирующих элементов и примесей  
в промышленных сплавах системы Al-Zn-Mg-Cu по ГОСТ4784-97

Сплав	Содержание компонентов и примесей, %							
	Zn	Mg	Cu	Mn	Cr	Zr	Fe	Si
B95	6,0	2,3	1,7	0,4	0,18	-	$\leq 0,5$	$\leq 0,5$
B95пч	5,75	2,3	1,7	0,4	0,18	-	$\leq 0,25$	$\leq 0,1$
B95оч	5,57	2,3	1,7	0,4	0,18	-	$\leq 0,15$	$\leq 0,1$
B96Ц	8,5	2,65	2,3	-	-	0,15	$\leq 0,4$	$\leq 0,3$
B96Ц-3	8,1	2,0	1,7	-	-	0,15	$\leq 0,2$	$\leq 0,1$
B93	6,9	1,9	1,0	-	-	-	0,2...0,4	$\leq 0,2$
B93пч	6,9	1,9	1,0	-	-	-	0,2...0,4	$\leq 0,1$
1933	6,9	1,9	1,0	-	-	0,12	$\leq 0,15$	$\leq 0,1$

Режим термической обработки T1 (см. табл. 40), соответствующий фазовой стадии старения, не обеспечивает достаточное сопротивление расслаивающей коррозии и коррозионному растрескиванию. Сплавы, обработанные по такому режиму, имеют низкие характеристики пластичности и вязкости разрушения [48]. Режимы коагуляционного ступенчатого старения T2 и T3, а также использование сплавов повышенной и особой чистоты (B95пч, B95оч) позволяют повысить пластичность, трещиностойкость и сопротивление расслаивающей коррозии и коррозионному растрескиванию. По коррозионной стойкости сплавы B95пч, B95оч, B93пч в состоянии T2 и T3 значительно превосходят дюралюмины.

Таблица 39

## Химический состав алюминиевых деформируемых сплавов по ISO 209-1:1989E, %, не более

Марка сплава	Номер**	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Zr	Примечания	Прочие		Al	
												Каждый	Всего		
AlZn5,5MgCu	7075	0,4	0,5	1,2-2	0,3	2,1-2,9	0,18-0,28	5,1-6,1	0,2	-	Ti+Zr 0,25***	0,05	0,15	остальное	
AlZn5,5MgCu(A)	7475	0,1	0,12	1,2-1,9	0,06	1,9-2,6	0,18-0,5	5,2-6,2	0,06	-	-	0,05	0,15	остальное	
AlZn6CuMgZr	7050	0,12	0,15	2-2,6	0,1	1,9-2,6	0,04	5,7-6,7	0,06	0,08-0,15	-	0,05	0,15	остальное	
AlZn6MgCu	7010	0,12	0,15	1,5-2	0,1	2,1-2,6	0,05	5,7-6,7	0,06	0,1-0,16	Ni 0,05	0,05	0,15	остальное	
AlZn6MgCuMn	-	0,5	0,5	1,4-2	0,2-0,6	1,8-2,8	0,1-0,25	5-7	0,05	-	Ni 0,1	0,05	0,1	остальное	
Марка сплава	Номер**	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Zr	Примечания	Прочие		Al	
												Каждый	Всего		
AlZn7MgCu	7178	0,4	0,5	1,6-2,4	0,3	2,4-3,1	0,18-0,28	6,3-7,3	0,2	-	-	0,05	0,15	остальное	
AlZn8MgCu	7049A	0,4	0,5	1,2-1,9	0,5	2,1-3,1	0,05-0,25	7,2-8,4		-	Ti+Zr 0,25	0,05	0,15	остальное	
Стандарт DIN EN 573-31:1994, Германия, %															
Номер сплава	Марка	Основные компоненты											Прочие элементы		Al, не менее
		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ga	V	Ti	в отдельности	в сумме	
EN AW 7049A	EN AW-AlZn5MgCu	0,4	0,5	1,2-1,9	0,5	2,1-3,1	0,05-0,25	-	7,2-8,4	-	-	-	0,05	0,15	остальное
EN AW 7149	EN AW-AlZn5MgCu(A)	0,15	0,2	1,2-1,9	0,2	2-2,9	0,1-0,22	-	7,2-8,2	-	-	0,1	0,05	0,15	остальное
EN AW 7050	EN AW-AlZn6CuMgZr	0,12	0,15	2-2,6	0,1	1,9-2,9	0,04	-	5,7-6,7	-	-	0,06	0,05	0,15	остальное
EN AW 7150	EN AW-AlZn6CuMgZr(A)	0,12	0,15	1,9-2,5	0,1	2-2,7	0,04	-	5,9-6,9	-	-	0,06	0,05	0,15	остальное
EN AW 7060	EN AW-AlZn7CuMg	0,15	0,2	1,8-2,6	0,2	1,3-2,1	0,15-0,25	-	6,1-7,5	-	-	0,05	0,05	0,15	остальное
EN AW 7009	EN AW-AlZn5,5MgCuAg	0,2	0,2	0,6-1,3	0,1	2,1-2,9	0,1-0,25	-	5,5-6,5	-	-	0,2	0,05	0,15	остальное
EN AW 7010	EN AW-AlZn6MgCu	0,12	0,15	1,5-2	0,1	2,1-2,6	0,05	0,05	5,7-6,7	-	-	0,06	0,05	0,15	остальное
EN AW 7012	EN AW-AlZn6Mg2Cu	0,15	0,25	0,8-1,2	0,08-1,5	1,8-2,2	0,04	-	5,8-6,5	-	-	0,02-0,08	0,05	0,15	остальное
EN AW 7075	EN AW-AlZn5,5MgCu	0,4	0,5	1,2-2	0,3	2,1-2,9	0,18-0,28	-	5,1-6,1	-	-	0,2	0,05	0,15	остальное
EN AW 7175	EN AW-AlZn5,5MgCu(B)	0,15	0,2	1,2-2	0,1	2,1-2,9	0,18-0,28	-	5,1-6,1	-	-	0,1	0,05	0,15	остальное
EN AW 7475	EN AW-AlZn5,5MgCu(A)	0,1	0,12	1,2-1,9	0,06	1,9-2,6	0,18-0,25	-	5,2-6,2	-	-	0,06	0,05	0,15	остальное
EN AW 7178	EN AW-AlZn7MgCu	0,4	0,5	1,6-2,4	0,3	2,4-3,1	0,18-0,28	-	6,3-7,3	-	-	0,2	0,05	0,15	остальное
Стандарт JIS, Япония, %															
Номер сплава	Легирующие компоненты и примеси									Прочие примеси		Al			
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Zr, Zr+Ti, V	Ti	в отдельности	в сумме				
7050	0,12	0,15	2-2,6	0,1	1,9-2,6	0,04	5,7-6,7	-	0,06	0,05	0,15	остальное			
7075	0,4	0,5	1,2-2	0,3	2,1-2,9	0,18-0,28	5,1-6,1	Zr+Ti 0,25	0,2	0,05	0,15	остальное			

Цирконий влияет на структуру и механические свойства алюминиевых сплавов (В96Ц, В96Ц-3, 1933) аналогично марганцу и хрому. Он также образует при кристаллизации перенасыщенный твердый раствор и повышает температуру рекристаллизации, что приводит к сохранению после термообработки перекристаллизованной структуры в прессованных и катаных полуфабрикатах и к структурному упрочнению (пресс-эффект). При распаде пересыщенного твердого раствора выделяются циркониевые интерметаллиды, причем более дисперсные, чем марганцевые и хромовые. В итоге добавки циркония препятствуют образованию крупнозернистой структуры в деформированных изделиях.

Все сплавы этой системы закаляются с температуры 460...470<sup>0</sup>С в холодной или горячей воде. Нагрев воды важен при закалке поковок во избежание их растрескивания и коробления. Закалка в горячей воде не влияет на коррозионную стойкость сплавов в отличие от дюралюминов.

Таблица 40

## Режимы термической обработки сплавов системы Al–Zn–Mg–Cu

Марка сплава	Вид полуфабриката	Обозначение	Режим ТО	
			Закалка	Старение
В95пч, В95оч	Листы	T1	465–475 °C	115–125 °C, 23–25 ч
		T2	475 °C	110–120 °C, 5–10 ч + + 160–170 °C, 14–18 ч
		T3	465–475 °C	110–120 °C, 5–10 ч + + 160–170 °C, 25–35 ч
	Плиты	T2	465–475 °C	110–120 °C, 5–10 ч + + 160–170 °C, 10–20 ч
		T3	465–475 °C	110–120 °C, 5–10 ч + + 160–170 °C, 15–25 ч
		T1	465–475 °C	135–145 °C, 15–17 ч
	Панели прес- сованные	T2	465–475 °C	135–145 °C, 15–17 ч
			465–475 °C	110–120 °C, 5–10 ч + + 160–170 °C, 10–14 ч
		T3	465–475 °C	110–120 °C, 5–10 ч + + 175–185 °C, 8–13 ч
	Штамповки, поковки	T2	465–475 °C	110–120 °C, 5–10 ч + + 175–185 °C, 4–10 ч
		T3	465–475 °C	110–120 °C, 5–10 ч + + 175–185 °C, 8–18 ч
В93пч	То же	T1	450–465 °C	115–125 °C, 3–10 ч + + 60–170 °C, 4–18 ч
		T2	450–465 °C	115–125 °C, 3–10 ч + + 170–180 °C, 6–12 ч
		T3	450–465 °C	115–125 °C, 3–10 ч + + 180–190 °C, 3–10 ч
В96Ц1	Профили прессованные	T1	465–475 °C	135–145 °C, 15–17 ч
		T2	465–475 °C	110–120 °C, 3–10 ч + + 170–180 °C, 3–20 ч

Сплавы В95пч и В95оч постепенно вытесняют наиболее распространенный сплав В95 из авиастроения как обеспечивающие более длительный ресурс эксплуатации и, следовательно, большую надежность конструкции планера самолета.

Сплав 1933, хотя и является модификацией сплава В93, отличается меньшей прокаливаемостью. Критическая скорость закалки для него составляет 20°С/с (3°С/с у сплава В93). В то же время добавки Zr (до 0,12 %) повышают прочность, вязкость разрушения и сопротивление усталости сплава 1933.

Ранее применявшийся сплав этой системы В94 (1,8...2,4 % Cu; 1,2...1,6 % Mg; 5,9...6,8 % Zn; 0,02...0,08 % Ti; ост. Al) не включен в ГОСТ 4784-97.

Сопротивление деформации сплавов системы (Al-Zn-Mg-Cu) в холодном и особенно в горячем состоянии изучено к настоящему времени достаточно обстоятельно. Истинное напряжение при растя-

жении и сжатии сплавов В95 и В96, принятое в качестве оценки величины  $\sigma_s$ , представлено графически для различного исходного состояния металла в справочнике [39] и на рис. 178-181.

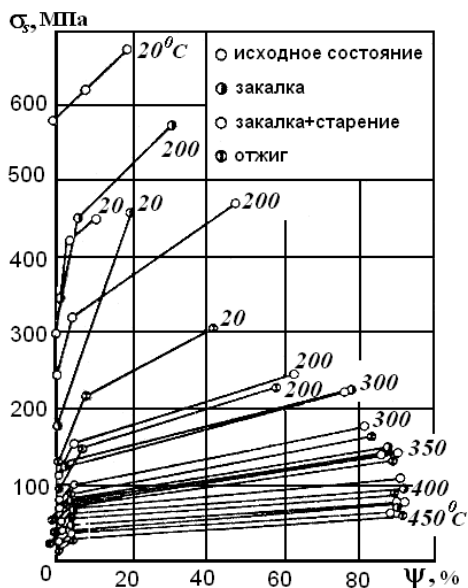


Рис. 178. Диаграмма истинных напряжений при растяжении высоколегированного сплава В95

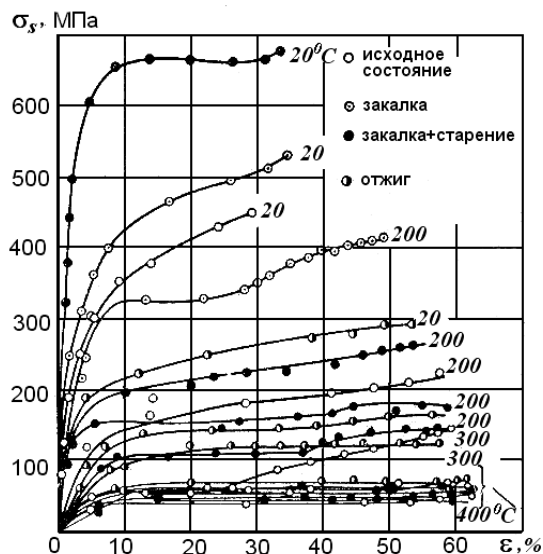


Рис. 179. Диаграмма истинных напряжений при сжатии высоколегированного алюминиевого сплава В95

Кривые упрочнения  $\sigma_s = \sigma_s(\varepsilon, t, \dot{\varepsilon})$ , полученные авторами [10, 17] при пластометрических испытаниях на сжатие, растяжение и на плоское сжатие сплавов В93 и В95 при различных состояниях исходного металла, приведены на рис. 182-186. Аналогичные зависимости для сплава В95-4 из справочника [25] представлены на рис. 187.

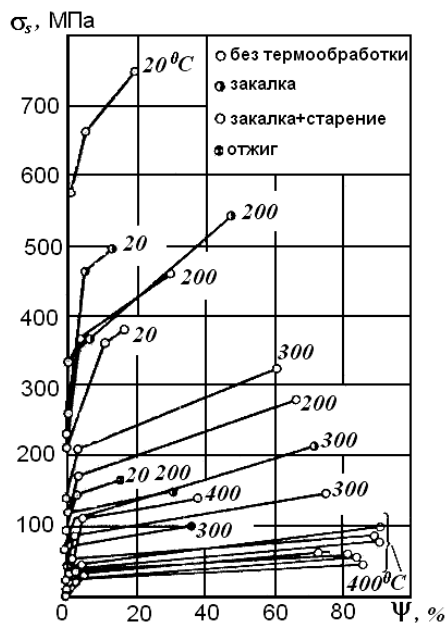


Рис. 180. Диаграмма истинных напряжений при растяжении высоколегированного алюминиевого сплава В96

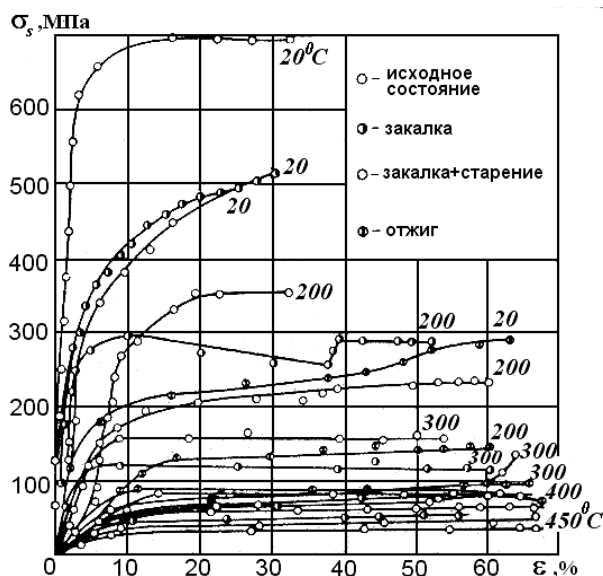


Рис. 181. Диаграмма истинных напряжений при сжатии высоколегированного алюминиевого сплава типа В96

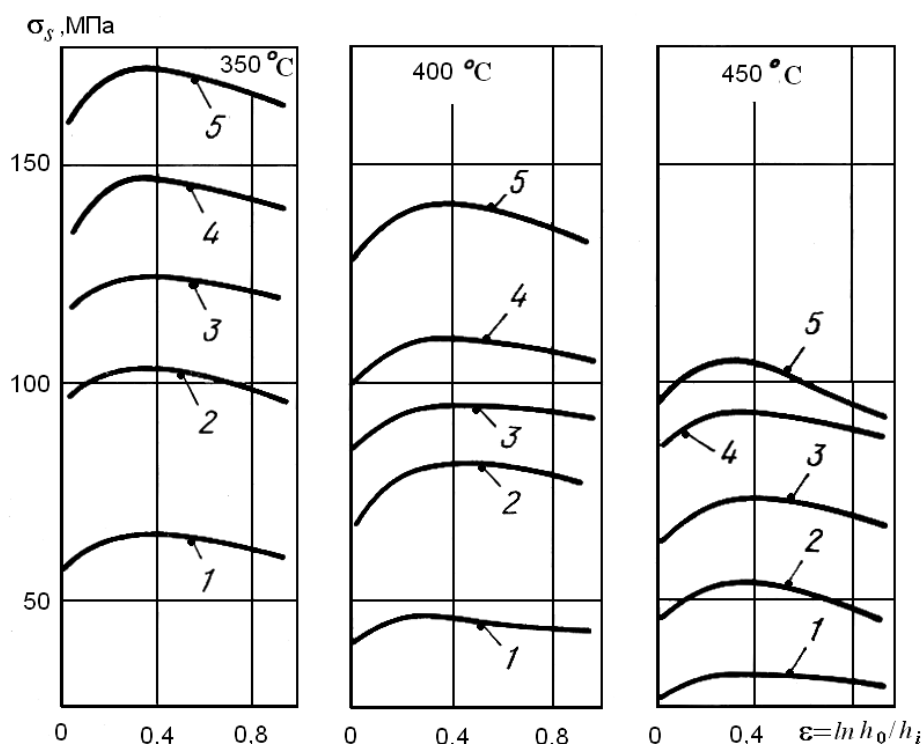


Рис. 182. Кривые деформационного упрочнения сплава В93 (1,1 % Cu; 1,9 % Mg; 4,75 % Zn; 91,9 % Al) после литья и гомогенизирующего отжига. Скорость деформации, с<sup>-1</sup>: 1 – 0,01; 2 – 1; 3 – 10; 4 – 100; 5 – 200

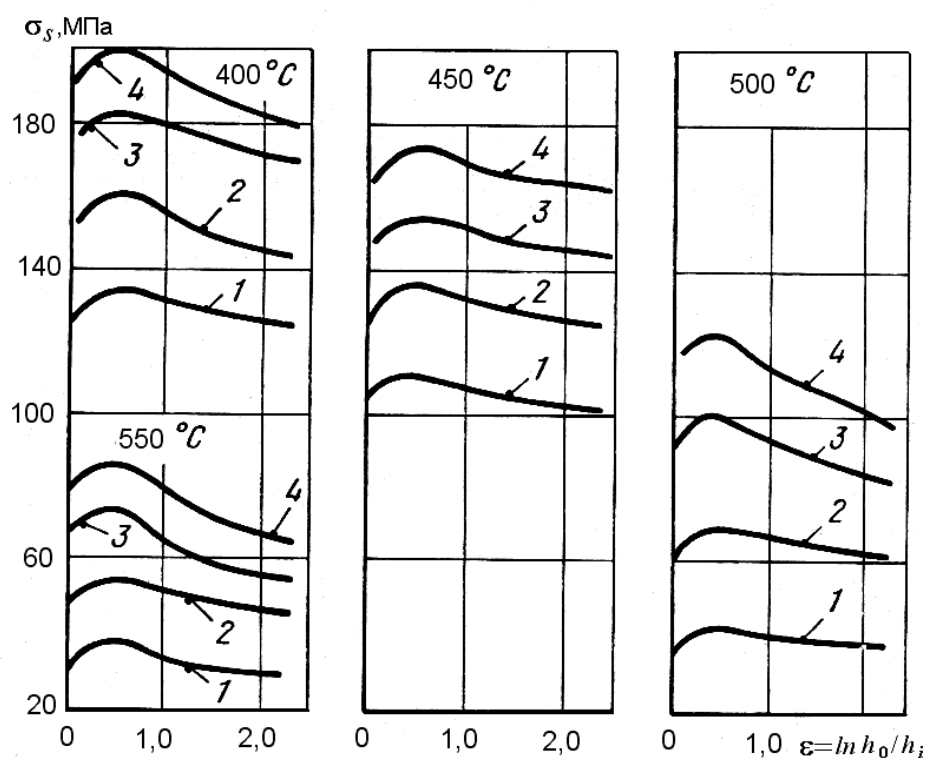


Рис. 183. Кривые испытаний на плоское сжатие сплава В95 (1,31 % Cu; 2,21 % Mg; 0,21 % Si; 0,30 % Fe; 0,34 % Mn; 5,75 % Zn). Скорость деформации, с<sup>-1</sup>: 1 – 0,4; 2 – 9; 3 – 10; 4 – 311

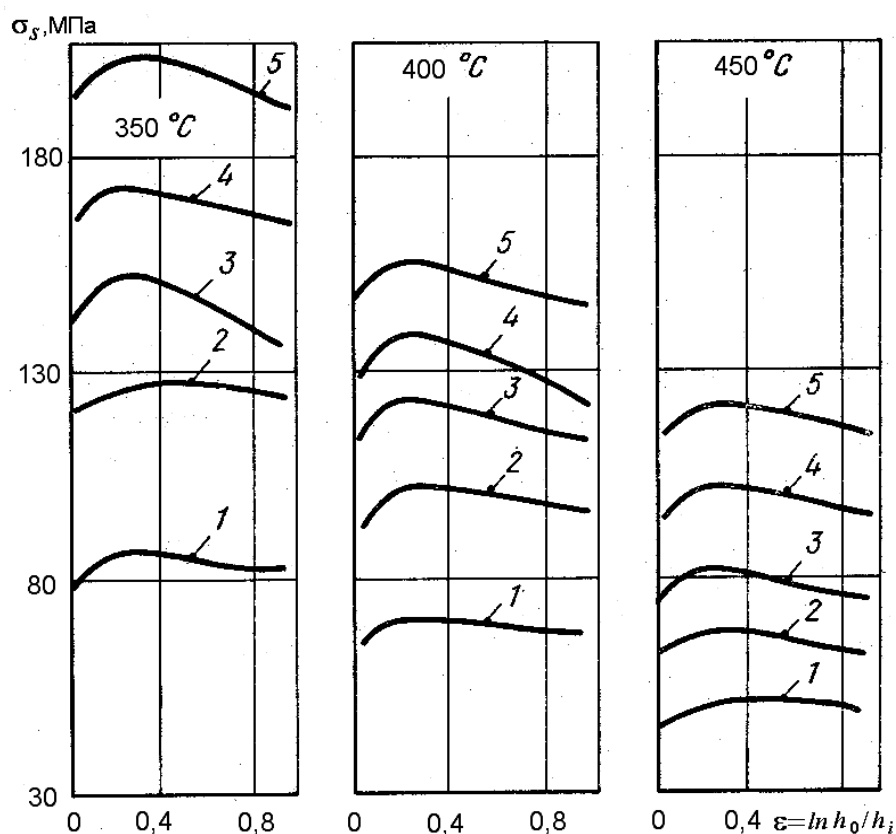


Рис. 184. Кривые деформационного упрочнения сплава В95 (1,7 % Cu; 2,1 % Mg; 0,4 % Mn; 5,3 % Zn; 89,8 % Al). Скорость деформации,  $\text{с}^{-1}$ : 1 – 0,01; 2 – 1; 3 – 10; 4 – 100; 5 – 200

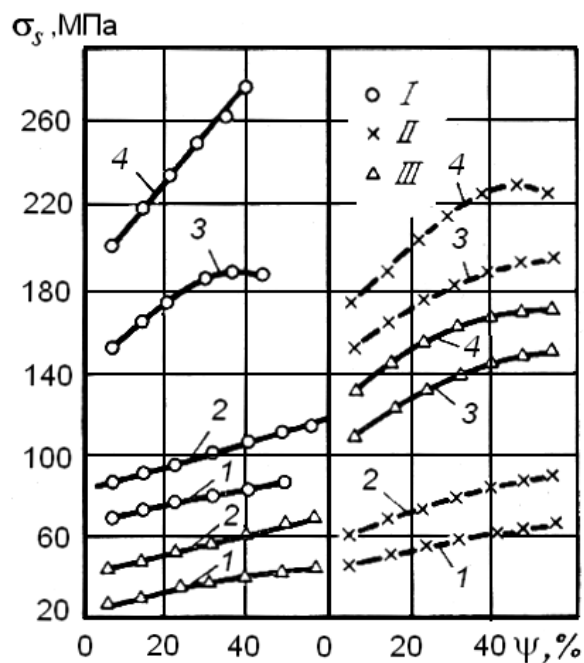


Рис. 185. Кривые деформационного упрочнения сплава типа В95 при температурных испытаниях на растяжение 360 (I), 420 (II) и 480°C (III). Скорость деформации,  $\text{с}^{-1}$ : 1 –  $3 \cdot 10^{-2}$ ; 2 –  $14 \cdot 10^{-2}$ ; 3 – 4; 4 – 14

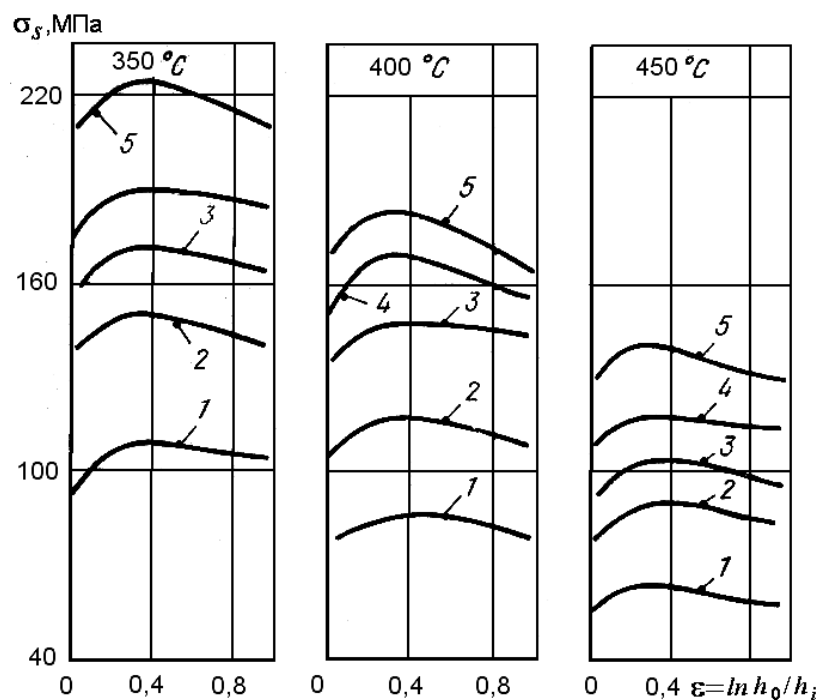


Рис. 186. Кривые деформационного упрочнения сплава В95-4 (1,5 % Cu; 5,2 % Zn; 2,4 % Mg; 0,6 % Mn; 89,5 % Al) после горячего прессования и отжига. Скорость деформации,  $\text{с}^{-1}$ : 1 – 0,01; 2 – 1; 3 – 10; 4 – 100; 5 – 200

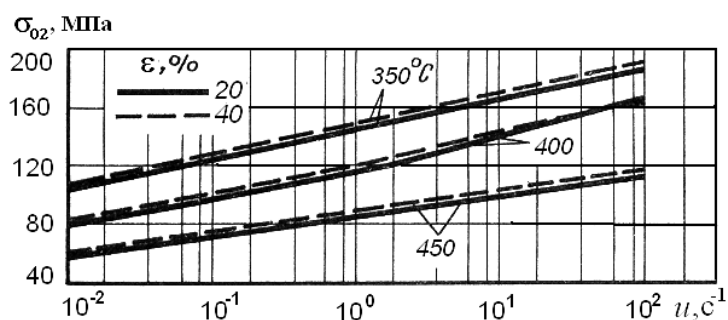


Рис. 187. Сопротивление деформации сплава В95-4 (1,5 % Cu; 5,2 % Zn; 2,4 % Mg; 0,6 % Mn; 89,5 % Al)

Кривые упрочнения сплава В95, полученные при испытаниях на растяжение и осесимметричную осадку на кулачковом пластометре (рис. 188) и приведенные в книге [27], существенно отличаются от результатов, полученных при испытании на плоское сжатие (рис. 183). В работе [27], к сожалению, не приведен химический состав испытуемого сплава, поэтому понять причины расхождения результатов испытаний не представляется возможным.



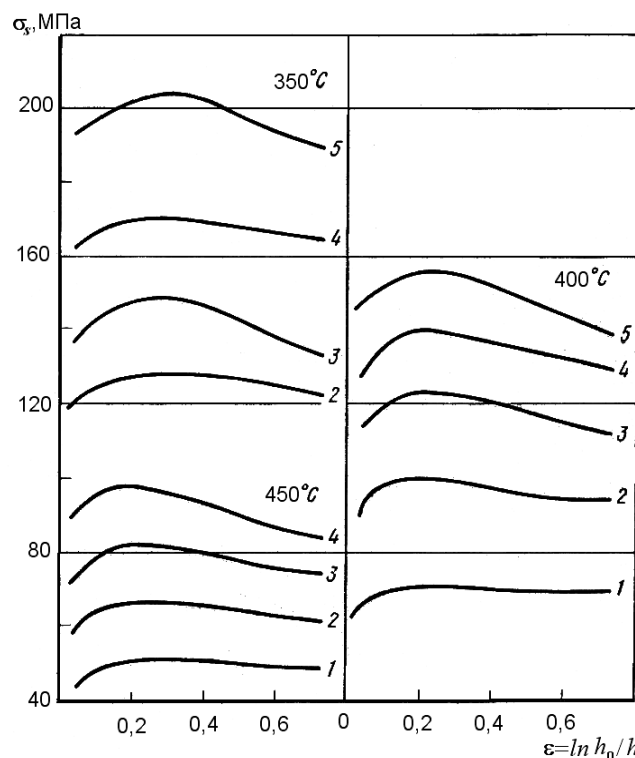


Рис. 188. Кривые испытаний на пластометре сплава В95:  
 1 –  $\xi = 0,01 \text{ с}^{-1}$ ; 2 –  $\xi = 1 \text{ с}^{-1}$ ; 3 –  $\xi = 10 \text{ с}^{-1}$ ; 4 –  $\xi = 100 \text{ с}^{-1}$ ; 5 –  $\xi = 200 \text{ с}^{-1}$ ;

Кривые упрочнения сплава В95 (рис. 189), полученные на кулачковом пластометре, изображенном схематично на рис. 28, автором [13], достаточно близки к приведенным на рис. 188. Неплохо совпадают кривые упрочнения сплава В93, представленные в работах [10, 49] и на рис. 182 и 190.

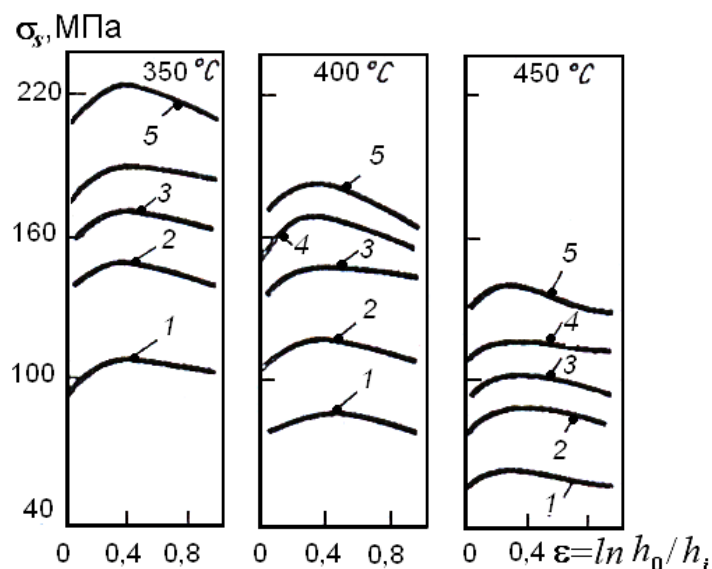


Рис. 189. Кривые деформационного упрочнения сплава В95 после горячего прессования и отжига. Скорость деформации,  $\text{с}^{-1}$ :  
 1 – 0,01; 2 – 1; 3 – 10; 4 – 100; 5 – 200

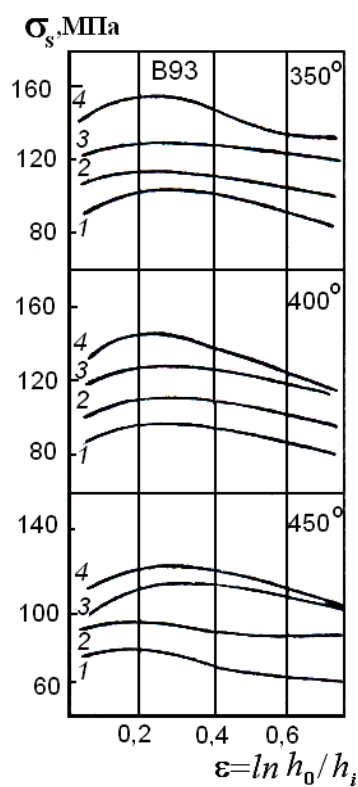


Рис. 190. Кривые изменения  $\sigma_s = f(\bar{\varepsilon})$  при испытании на сжатие  
алюминиевого сплава В93

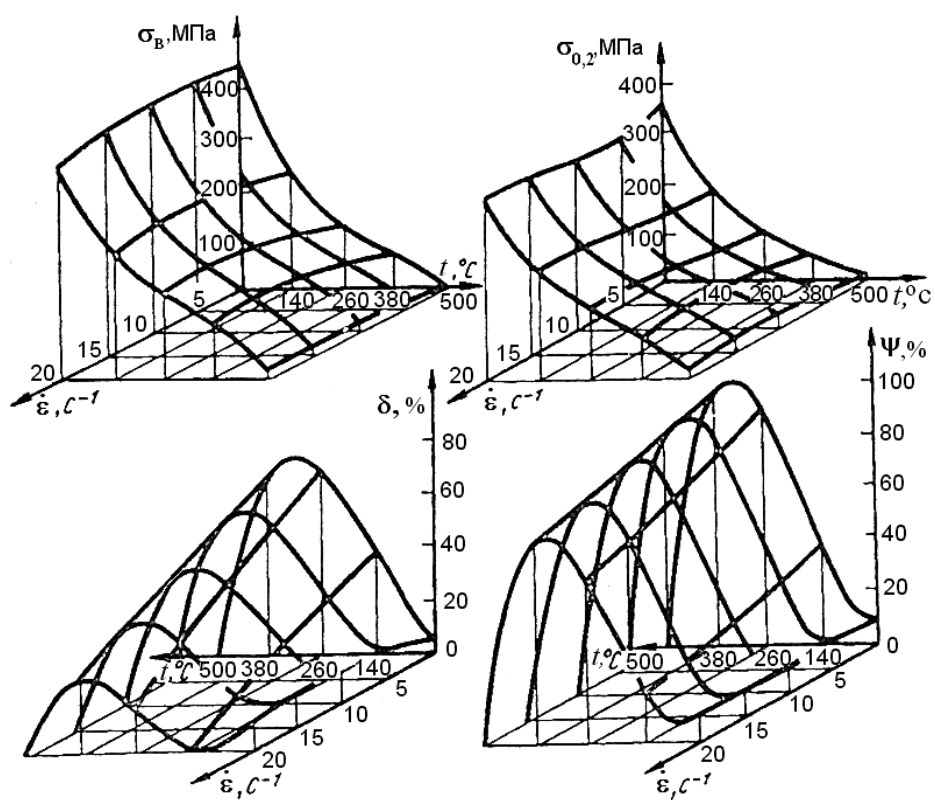


Рис. 191. Зависимость механических свойств сплава В96 в деформированном  
состоянии от скорости и температуры деформации

Считается, что сопротивление деформации при горячей обработке слабо зависит от степени деформации. Микляев П.Г. в работах [13,42] приводит зависимости  $\sigma_{02} = \sigma_{02}(t, \dot{\epsilon})$ , полученные при испытаниях на сжатие (рис. 191-193), и  $\tau_{ср}^{02} = \tau_{ср}^{02}(V, t)$ , полученные при испытаниях на срез со скоростью  $V$  (рис. 194).

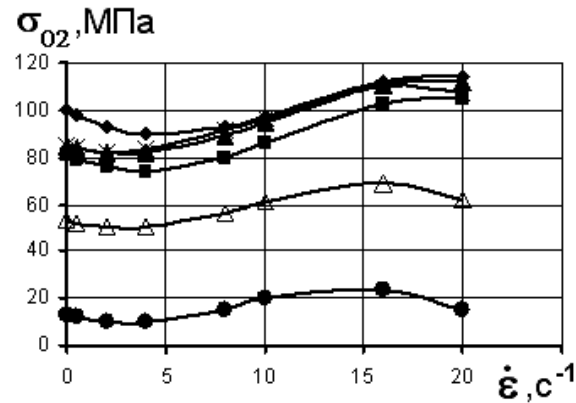


Рис. 192. Сопротивление деформации сплава В95 в литом состоянии при различных скоростях и температурах деформации:

◆ – 50°C; ■ – 150°C; ▲ – 250°C; х – 350°C; Δ – 450°C; • – 500°C

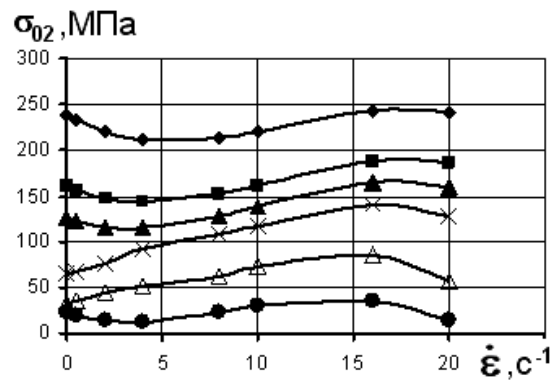


Рис. 193. Сопротивление деформации сплава В95 в деформированном состоянии при различных скоростях и температурах деформации:

◆ – 50°C; ■ – 150°C; ▲ – 250°C; х – 350°C; Δ – 450°C; • – 500°C

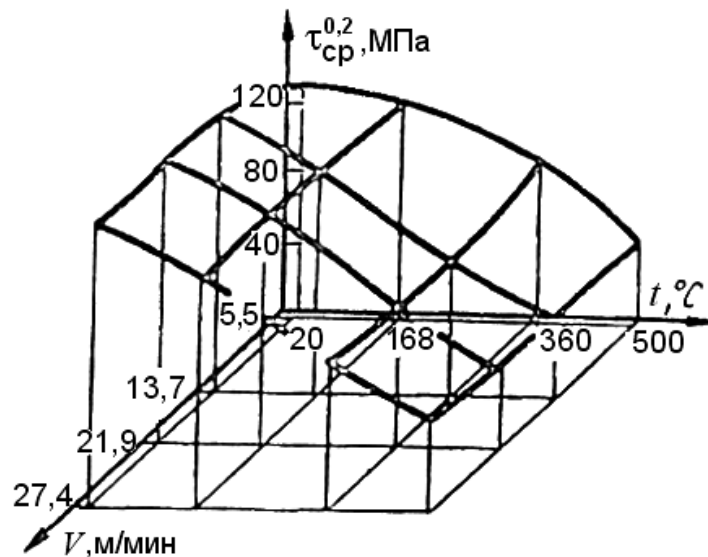


Рис. 194. Зависимость предела текучести при срезе сплава В95 в литом состоянии от скорости и температуры деформации

Для анализа процессов прессования при больших степенях деформации удобны зависимости сопротивления деформации от температуры  $t$  и времени деформирования  $\tau_d$ , приведенные для сплава В95 в книге [38] и на рис. 195.

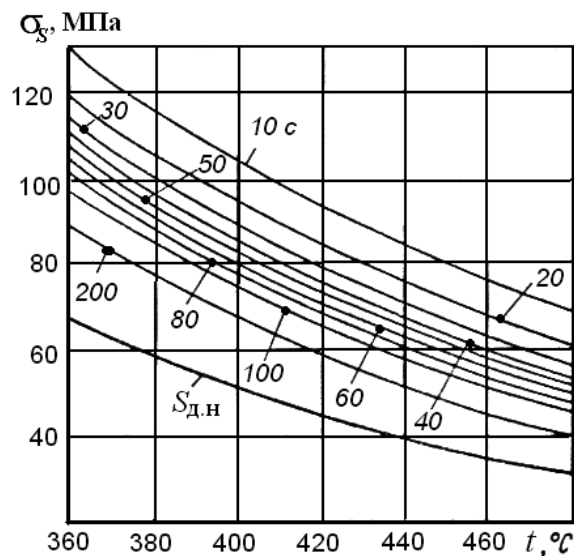


Рис. 195. Зависимость сопротивления деформированию сплава В95 от температуры  $t$  и длительности деформации  $\tau_d$

Для прессовыхковки и штамповки пригодны зависимости сопротивления деформации от степени и температуры деформации (рис. 196) [39].

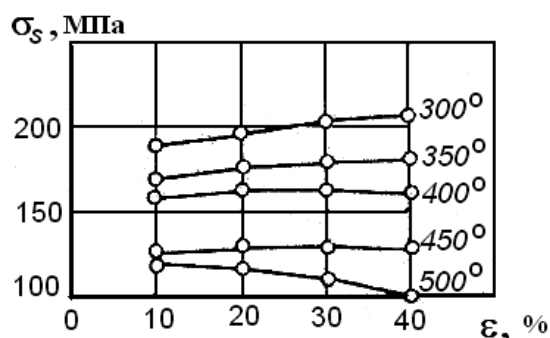


Рис. 196. Кривые течения алюминиевого сплава В95

## 5.12. Алюминиевые сплавы, легированные литием

К этим сплавам относятся сплавы систем (Al-Mg-Li), (Al-Cu-Li) и (Al-Cu-Mg-Li). Химический состав отечественных алюминиево-литиевых сплавов приведен в табл. 41.

Таблица 41

Химический состав деформируемых алюминиево-литиевых сплавов по ГОСТ4784-97

Сплав	Содержание элементов (остальное Al), мас. %.							
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zr	Li	Другие
1420	0,1-0,3	0,3	-	0,3	5,0-6,0	0,09-0,15	1,9-2,3	Na ≤0,0008
1450	0,1	0,15	3,0	-	-	0,11	2,05	
1440	0,1	0,15	1,55	-	0,85	0,12	2,35	
								Прочие
								0,005
								0,01
								0,01

В системе (Al-Mg-Li) обнаружена широкая область концентраций компонентов сплавов, имеющих значительный эффект упрочнения при термообработке. Эффект старения в основном определяется содержанием лития от 1 до 2,8 %. Твердый раствор в сплаве 1420 устойчив, и после нагрева под закалку до 450°С твердый раствор образуется даже после охлаждения на воздухе при комнатной температуре. Такое охлаждение обеспечивает высокую коррозионную стойкость изделий. Искусственное старение проводится при 120°С в течение 10...15 часов. Упрочнение сплава 1420 при естественном старении практически отсутствует. После термообработки прочность сплава близка к прочности дюралюминов при меньшей плотности 2500 кг/м<sup>3</sup> и более высоком модуле нормальной упругости (69...72 ГПа). Сплав 1420 после закалки на воздухе имеет достаточно высокую коррозионную стойкость и свариваемость всеми видами сварки. Этот сплав технологичен в металлургическом производстве,

однако характеризуется повышенной окисляемостью при плавке и литье.

Кривые упрочнения сплава 1420, полученные на кулачковом пластометре, опубликованы в справочнике [13] (рис. 197).

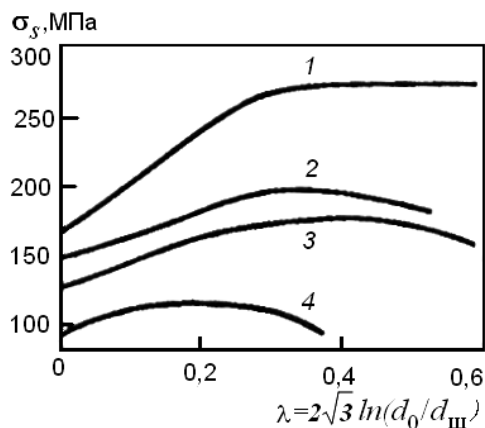


Рис. 197. Кривые деформационного упрочнения сплава 1420 в литом состоянии при температурах 250 (1), 400 (3), 450 (4) °C и при скорости деформации 5 с<sup>-1</sup>

Другие данные по сопротивлению деформации сплава 1420 в доступной литературе отсутствуют.

Алюминиево-литиевые сплавы, содержащие медь, марок 1450 и 1440 пришли на смену сплаву ВАД23, характеризующемуся более высоким содержанием меди, а также примесей железа и кремния. Сплавы систем (Al-Cu-Li) и (Al-Cu-Mg-Li) подвергаются закалке с 530...540 °C в холодной воде и последующему искусственному старению:

- для сплава 1450 при 160 °C 30 ч + 120 °C 20 ч + 170 °C 10 ч;
- для сплава 1440 при 140...150 °C 24 ч.

Для этих сплавов эффективна НТМО по схеме: закалка, холодная деформация 2...4 %, искусственное старение. Это повышает прочностные свойства сплава без значительного снижения пластичности. Сплав 1450 по комплексу механических характеристик не уступает сплаву В95, имея низкую плотность (2600 кг/м<sup>3</sup>) и высокий модуль упругости (~80 ГПа).

Существенными недостатками всех алюминиево-литиевых сплавов являются технологические трудности при плавке и литье (высокая химическая активность расплава) и при холодной пластической обработке (низкая пластичность и локализация деформаций в полосах скольжения).

## 6. Магний и его сплавы

### 6.1. Магний технический

Магний относится к наиболее распространенным в земной коре элементам (2,1 %) и уступает лишь алюминию (8,8 %) и железу (5,1 %). Важнейшим свойством магния является его малая плотность, что определяет высокие уровни удельной прочности и удельной жесткости. Хорошо обрабатывается резанием. К главным его недостаткам следует отнести низкую коррозионную стойкость и неудовлетворительную пластичность в холодном состоянии, определяемую гексагональной кристаллической решеткой. Невысок также модуль нормальной упругости: почти в два раза ниже, чем у Al, и в пять раз – чем у стали. В магнии затруднены деформационные процессы, что определяет длительный нагрев под закалку термоупрочняемых сплавов.

Калий, натрий, медь, никель и железо являются вредными примесями, снижающими пластичность и коррозионную стойкость. Вредное влияние на свойства магния оказывают газы, особенно кислород и водород.

Магний корродирует во влажном воздухе, морской воде, в трехпроцентном растворе хлористого натрия, в разбавленных минеральных кислотах. С нагревом скорость коррозии сильно возрастает.

В зависимости от примесей установлены следующие марки технического магния: Мг96 (99,96 % Mg); Мг95 (99,95 % Mg) и Мг90 (99,9 % Mg). В настоящее время освоено производство высокочистого магния (99,9999 % Mg). Химический состав технического магния по ГОСТ 804-93 приведен в табл. 42.

Таблица 42

Химический состав технического магния (ГОСТ 804-93, мас. % [45])

Марка	Mg, не менее	Примеси, не более							Сумма регламент. примесей
		Fe	Si	Ni	Cu	Al	Mn	Cl	
Мг06	99,96	0,004	0,005	0,002	0,002	0,006	0,004	0,003	0,030
Мг95	99,95	0,004	0,005	0,007	0,003	0,007	0,010	0,005	0,035
Мг90	99,90	0,040	0,010	0,001	0,005	0,020	0,040	0,005	1,100

Примечания. 1. Содержание примесей, не вошедших в сумму регламентируемых предприятием-изготовителем, должно быть не более: 0,01 % Na в магнии всех марок; 0,005 % K в магнии всех марок; 0,014 % Ti в магнии марки Мг95. 2. С согласия потребителей в магнии марки Мг90 допускается не более 0,05 % Fe и не более 0,002 % Ni.

Физические механические свойства технического магния представлены в табл. 43.

Таблица 43

Физические и механические свойства технического магния [35]

Атомная масса	24,32
Плотность при 20 <sup>0</sup> С, кг/м <sup>3</sup>	1740
Температура плавления, <sup>0</sup> С	650
Скрытая теплота плавления, кДж/моль	8,56
Увеличение объема при плавлении, %	4,2
Температура кипения, <sup>0</sup> С	1107
Скрытая теплота парообразования, кДж/моль	128
Удельная теплоемкость при 25 <sup>0</sup> С, Дж/(кг·К)	995
Теплопроводность при 20 <sup>0</sup> С, Вт/(м·К)	156
Коэффициент линейного расширения $\alpha \times 10^5$ при температуре, <sup>0</sup> С:	
100.....	25,5
200.....	26,2
300.....	27,0
Удельное электросопротивление при 18 <sup>0</sup> С, Ом·мм <sup>2</sup> /м	0,047
Температурный коэффициент электросопротивления $\times 10^3$	3,9
Стандартный электродный потенциал В	-2,34
Электрохимический эквивалент, г/(А·ч)	0,454
Модуль нормальной упругости $E$ , ГПа	45
Модуль сдвига $G$ , ГПа	17
Предел упругости $\sigma_e$ , МПа	12
Предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа:	
литой.....	21
деформированный...	185
отожженный.....	96
Предел усталости отожженного магния при $50 \cdot 10^7$ циклов $\sigma_{-1}$ , МПа	62
Предел прочности при растяжении $\sigma_B$ , МПа:	
литой.....	83-127
деформированный..	25
отожженный.....	18
Относительное удлинение $\delta$ , %:	
литой.....	3-6
деформированный..	8-10
отожженный.....	15-17
Сопротивление срезу отожженного магния $\sigma_{ср}$ , МПа	120
Твердость НВ, МПа	
литой.....	300
деформированный...	500
отожженный.....	400
Коэффициент Пуассона	0,35



Зарубежные марки технического магния и их химический состав приведены в табл. 44.

Таблица 44

Химический состав первичного магния											
Страна	Стандарт	Марка	Fe	Ni	Cu	Si	Al	Mn	Ti	Прочие	Mg, не менее
США	ASTM B 92	9995A	0,003	0,001	-	0,005	0,01	0,004	0,01	0,005	99,95
		9980	-	0,001	0,02	-	-	0,15	0,01	0,05	99,8
Германия	DIN 17800	H-99,95	0,003	0,001	0,002	0,01	-	-	-	0,01	99,95
Канада	HG2-99	99,99	0,002	0,0005	0,0005	0,001	0,001	0,001	-	0,005	99,99
	HG2-97	99,97	0,005	0,001	0,001	0,005	0,001	0,004		0,008	99,97
	HG2-95	99,95	0,005	0,001	0,001	0,03	0,003	0,01		0,01	99,95

Свойства магния технической чистоты существенно зависят от содержания примесей (Al, Fe, Si, Na, K, Cu и Ni). Алюминий имеет высокую растворимость в магнии в тех количествах, в которых он выступает как примесь. Он полностью входит в твердый раствор и не оказывает большого влияния на структуру и свойства технического магния.

В деформируемом магнии проявляется ярко выраженная текстура. Разница в свойствах полуфабрикатов в различных направлениях может составлять 30...35 %. После интенсивной холодной деформации технический магний начинает рекристаллизоваться уже при 150<sup>0</sup>С. Критическая степень деформации для технического магния составляет 5...10 %.

## 6.2. Системы маркировки магния и его сплавов

Литейные и деформируемые магниевые сплавы в отечественных стандартах (ГОСТ) обозначаются следующим образом:

МЛ – магниевые литейные сплавы (ГОСТ 2856);

МА – магниевые деформируемые сплавы (ГОСТ 14957);

п.ч. – повышенной чистоты;

о.н. – общего назначения.

Литейные магниевые сплавы подразделяются в зависимости от способа литья: в песчаные формы, в кокиль, литье под давлением и др.

Деформируемые магниевые сплавы классифицируются на сплавы для прессования,ковки, штамповки, для горячей и холодной прокатки; по прочности при нормальных и повышенных температурах, коррозионной стойкости и плотности.

В США и некоторых других странах магниевые сплавы маркируют по системе, разработанной ASTM, в соответствии с химическим составом и состоянием поставки. Обозначение сплавов начинается с двух букв, представляющих два основных легирующих элемента. Буквы располагаются по убыванию содержания элементов или при равных их количествах – по алфавиту. Затем следуют цифры, указывающие содержание элементов в целых процентах. Последующие буквы (А, В, С) отражают модификацию сплава по содержанию второстепенных легирующих элементов или примесей. Чистота сплава увеличивается от С до А, т.е. А – наиболее чистый. Символ Х обозначает, что сплав новый и пока не стандартизован, т.е. так называемый «временно стандартизованный сплав», например AZ81XA.

Обозначения магниевых сплавов по ASTM:

А – алюминий	Н – торий
З – цинк	Е – редкоземельные металлы
М – марганец	Л – литий
К или W – цирконий	Q – серебро

В Британском стандарте (BS) магниевые сплавы обозначают символом MAG (MAGNESIUM) и порядковым номером. Для деформируемых сплавов обозначение усложняется введением дополнительной буквы, указывающей вид полуфабрикатов, например MAG-E-121 – магниевый сплав для прессованных (Extruded) полуфабрикатов; MAG-S-151 – магниевый сплав для листов (Sheet) и плит.

В Японии магниевые литейные сплавы обозначаются символом MC (Magnesium Castings), деформируемые магниевые сплавы – MP, MB, MS. Первая буква – магний (Magnesium), вторая – вид полуфабриката: P – плита, лист (Plate), B – пруток (Bar), S – профиль (Shape). Помимо буквенного обозначения в японской марке присутствует цифра номера сплава, например MC3, MP5 и т.п.

Магниевые сплавы за рубежом помимо стандартных обозначений часто имеют дополнительные обозначения и торговые марки различных организаций и фирм. Например, сплав AZ31 (США) в Англии может иметь марку MAG-111, AZ31 Электрон А4, в Германии – MgA31Zn, Магнезал W383 и т.п.

### 6.3. Деформируемые сплавы магния. Марки. Свойства. Сопротивление деформации

Все деформируемые магниевые сплавы можно подразделить на группы по системам сплавов: (Mg-Mn); (Mg-Al-Zn-Mn); (Mg-Zn-Zr); (Mg-PЗМ); (Mg-Y-Cd); (Mg-Li). Химический состав промышленно используемых деформируемых магниевых сплавов по ГОСТ 14957-76 приведен в табл. 45.

Таблица 45

Химический состав магниевых деформируемых сплавов, мас. %  
по ГОСТ 14957-76 [34]

Система	Сплав	Al	Mn	Zn	PЗМ	Прочие элементы
Mg-Mn	MA1	—	1,3...2,5	—	—	—
	MA8	—	1,3...2,2	—	(0,15...0,35)Ce	—
Mg-Al-Zn-Mn	MA2	3,0...4,0	0,15...0,5	0,2...0,8	—	—
	MA2-1	3,8...5,0	0,3...0,7	0,8...1,5	—	—
	MA3	5,5...7,0	0,15...0,5	0,5...1,5	—	—
	MA5	7,8...9,2	0,15...0,5	0,2...0,8	—	—
	MA14	—	—	5,0...6,0	—	(0,3...0,9)Zr
Mg-Zn-Zr	MA15	—	—	2,5...3,5	(0,7...1,1)La	(1,2...2,0)Cd (0,45...0,9)Zr
	MA19	—	—	5,5...7,0	(1,4...2,0)Nd	(0,2...1,0)Cd
	MA20	—	—	1,0...1,5	(0,12...0,2)Ce	(0,05...0,12)Zr
Mg-PЗМ	MA12	—	—	—	(2,5...3,5)Nd	(0,3...0,8)Zr
Mg-Y-Cd	ВМД10	—	0,4...0,6	—	(0,05...0,15)Ce	(7,8...9,0)Y (0,2...0,5)Cd
	MA21	4,0...6,0	0,1...0,4	0,8...2,0	—	(3,0...5,0)Cd (7,0...9,0)Li
Mg-Li	MA18	0,5...1,0	0,1...0,4	2,0...2,5	(0,15...0,35)Ce	(10,0...11,5)Li

Марки зарубежных магниевых сплавов приведены в табл. 46.

При легировании магния марганцем улучшаются свариваемость и коррозионная стойкость. Сплавы Mg-Mn термической обработкой не упрочняются. Из сплавов системы (Mg-Mn) в основном производится МА8, отличающийся высокой коррозионной стойкостью и удовлетворительной свариваемостью. Структура МА8 представлена твердым раствором марганца в магнии и выделениями чистого марганца. В сплав вводят церий для повышения  $\sigma_B$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\delta$  в целях улучшения обрабатываемости в холодном состоянии. Улучшение свойств при введении церия связано с дисперсионными выделениями фазы  $Mg_9Ce$  и соответствующим измельчением зерна [50].

Таблица 46

**Химический состав магниевых деформируемых сплавов  
по стандартам США, Великобритании и Японии**

Страна	Стандарт	Марка сплава	Содержание, не более, %								
			Al	Zn	Mn	Zr	РЗМ или другие элементы	Fe	Si	Ni	Прочие
США	ASTM B107	AZ31B	2,5-3,5	0,6-1,4	0,2 min	-	-	0,005	0,1	0,005	0,3
		AZ31C	2,4-3,7	0,5-1,6	0,15 min	-	-	-	0,1	0,03	0,3
		AZ61A	5,8-7,2	0,4-1,5	0,15 min	-	-	0,005	0,1	0,005	0,3
		AZ80A	7,8-9,2	0,2-0,8	0,12 min	-	-	0,005	0,1	0,005	0,3
		M1A	-	-	1,2 min	-	Ca 0,3 max	-	0,1	0,01	0,3
		ZK60A	-	4,8-6,2	-	0,45 min	-	-	-	-	0,3
США	ASTM B90	AZ31B	2,5-3,5	0,7-1,3	0,2 mm	-	-	0,005	0,1	0,005	0,3
		AZ31C	2,4-3,6	0,5-1,5	0,15 min	-	-	-	0,1	0,03	0,3
		ZE10A	-	1-1,5	-	-	РЗМ 0,12-0,22	-	-	-	0,3
	ASTM B91	AZ31B	2,5-3,5	0,6-1,4	0,2 min	-	-	0,005	0,1	0,005	0,3
		AZ61A	5,8-7,2	0,4-1,5	0,15 min	-	-	0,005	0,1	0,005	0,3
		AZ80A	7,8-9,2	0,2-0,8	0,12 min	-	-	0,005	0,1	0,005	0,3
Великобритания	BS 3370	MAG-S-101	0,05	0,03	1-2	-	-	0,03	0,02	0,005	-
		MAG-S-111	2,5-3,5	0,6-1,4	0,15-0,4	-	-	0,03	0,1	0,005	-
	BS 3373	MAG-E-101	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		MAG-E-111	2,5-3,5	0,6-1,4	0,15-0,4	-	-	0,03	0,1	0,005	-
		MAG-E-121	5,5-6,5	0,5-1,5	0,15-0,4	-	-	0,03	0,1	0,005	-
		MAG-E-161	0,02	4,8-6,2	0,15	0,45-0,8	-	0,01	0,01	0,005	-
Япония	JIS H4201	MP1	2,5-3,5	0,5-1,5	0,15 min	-	-	0,01	0,1	0,005	0,3
	JIS H4203	MB1	2,4-3,6	0,5-1,5	0,15 min	-	-	0,01	0,1	-	0,3
		MB2	5,8-7,2	0,4-1,5	0,05 min	-	-	0,01	0,1	-	-
	JIS H4204	MS1	2,5-3,5	0,5-1,5	0,15 min	-	-	0,01	0,1	-	0,3
		MS2	5,8-7,2	0,4-1,5	0,05 min	-	-	0,01	0,1	-	-
		NP7	1,5-2,4	0,5-1,5	0,05 min	-	-	0,01	0,1	0,005	0,3

В сплавах системы (Mg-Al-Zn-Mn), упрочняемых термообработкой, упрочнение при старении обусловлено выделением упрочняющих фаз  $Mg_{17}Al_{12}$  и  $Mg_3Zn_3Al_2$ . Большое содержание Al снижает пластичность сплавов в холодном и горячем состояниях. Цинк при содержании более 1,5 % также ухудшает обрабатываемость сплавов давлением. В отличие от других сплавов этой системы МА2-1 хорошо сваривается, термически не упрочняется и поставляется в отожженном, полунагартованном или горячедеформированном состояниях.

Сплавы системы (Mg-Zn-Zr) имеют высокий уровень механических свойств, что определено упрочняющим действием цинка в сочетании с модифицирующим действием циркония. Образующиеся интерметаллиды Zr с Fe очищают сплавы от вредной примеси железа. Кроме того, Zr связывает водород и препятствует развитию пористости. Цирконий повышает прочность и пластичность сплавов, а также коррозионную стойкость. Сложность ввода циркония в сплавы определяется его малой растворимостью даже в расплаве магния.

Благоприятно на механических свойствах и на технологичности сплавов этой системы сказывается легирование кадмием и РЗМ, но

одновременно ухудшается свариваемость, поэтому сплавы годятся лишь для изготовления поковок.

Сплавы системы (Mg-PЗМ) типа МА12 характеризуются жаропрочностью и могут устойчиво работать при температуре до 200<sup>0</sup>С. Чаще всего легирование осуществляется ниодимом с образованием упрочняющей фазы Mg<sub>9</sub>Nd. В эти сплавы дополнительно вводят марганец и никель, что повышает их сопротивление ползучести, длительную прочность. Цирконий вводится как модификатор для измельчения зерна.

К этой же группе сплавов можно отнести ВМД10, легированный иттрием и кадмием, который отличается высокой технологичностью и пригоден для изготовления давлением всех видов полуфабрикатов.

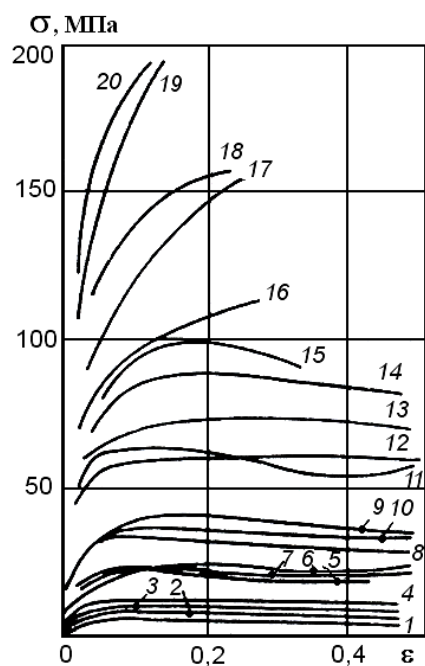
Основная цель создания сплавов системы (Mg-Li) – снижение плотности, которое составляет 10...25 % по отношению к другим сплавам магния, 25...30 % по отношению к сплавам бериллия и 50 % по отношению к алюминиевым сплавам. Литий также повышает жесткость сплавов. Поскольку с повышением концентрации лития в сплавах снижается прочность, их дополнительно легируют алюминием, цинком, кадмием, РЗМ. В отличие от других сплавов магниеволитиевые сплавы характеризуются повышенным модулем упругости и удовлетворительной коррозионной стойкостью [50]. Высокопрочные Mg-Li сплавы, имеющие ОЦК-структуру, обладают склонностью к перестариванию даже при незначительном повышении температуры. Эти сплавы проявляют чувствительность к коррозии под напряжением.

Кривые упрочнения технического магния (99,3 %Mg) получены испытанием на осадку при различных температурах и скоростях деформации Соколовым Л.Д. [16] – приведены на рис. 198. Приведенные графики включают данные о сопротивлении деформации при комнатной температуре, поэтому кривые 19 и 20 могут рассматриваться как кривые степенного упрочнения технически чистого магния.

Сопротивление горячей деформации технического магния определено пластометрическими исследованиями и графически представлено в справочниках [10, 17, 25] (рис. 199, 200).

Авторы справочника [44] приводят кривую степенного упрочнения сплава МА2, полученную испытанием на растяжение образца, предварительно упрочненного прокаткой металла (рис. 201).





Кривая	Темпе- ратура, °C	$\dot{\epsilon}$ , с <sup>-1</sup>	Кривая	Темпе- ратура, °C	$\dot{\epsilon}$ , с <sup>-1</sup>
1	400	$3,5 \cdot 10^{-4}$	11	200	$2 \cdot 10^{-2}$
2	400	$2 \cdot 10^{-3}$	12	150	$3,5 \cdot 10^{-4}$
3	400	$2 \cdot 10^{-2}$	13	150	$2 \cdot 10^{-3}$
4	300	$3,5 \cdot 10^{-4}$	14	200	$2 \cdot 10^{-1}$
5	400	$2 \cdot 10^{-1}$	15	150	$2 \cdot 10^{-2}$
6	300	$2 \cdot 10^{-3}$	16	100	$2 \cdot 10^{-3}$
7	300	$2 \cdot 10^{-2}$	17	100	$2 \cdot 10^{-2}$
8	200	$3,5 \cdot 10^{-4}$	18	100	$2 \cdot 10^{-1}$
9	300	$2 \cdot 10^{-1}$	19	20	$3,5 \cdot 10^{-4}$
10	200	$2 \cdot 10^{-3}$	20	20	$2 \cdot 10^{-3}$

Рис. 198. Кривые деформационного упрочнения магния (99,3 %) при сжатии образцов размером 12×20 мм

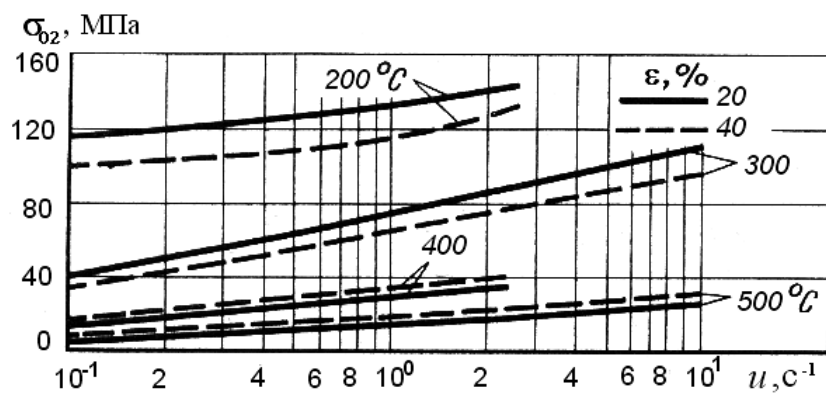


Рис. 199. Сопротивление деформации технически чистого магния (99,90 %)

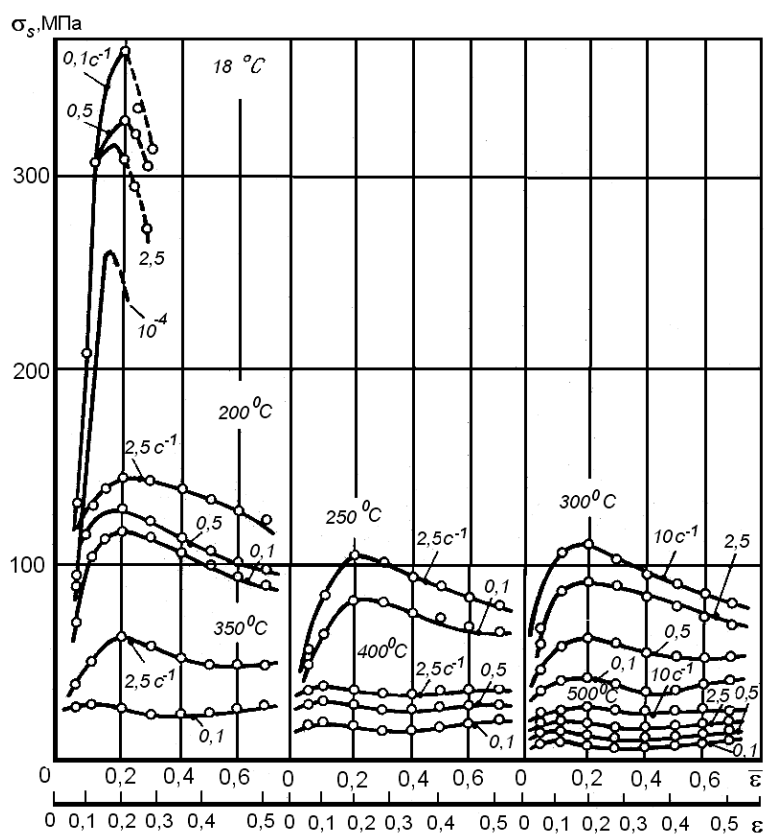


Рис. 200. Кривые испытаний на сжатие магния (99,9%); образцы после прессования, холодного волочения и отжига

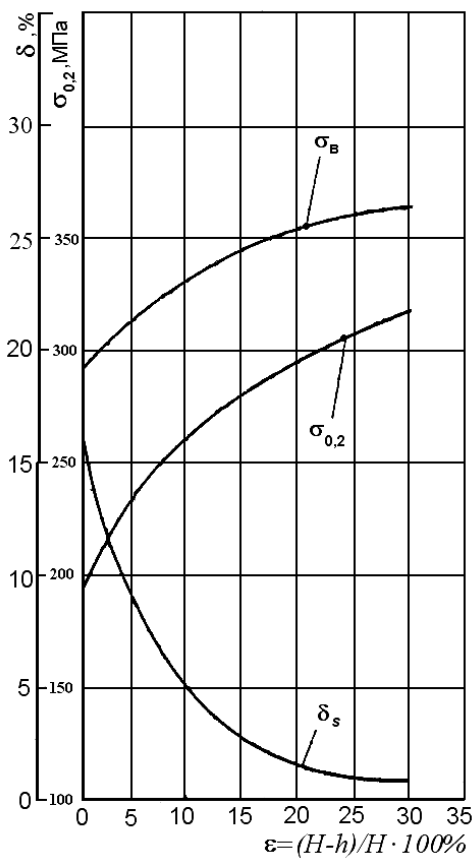


Рис. 201. Кривая степенного упрочнения ( $\sigma_{0,2}$ ) магниевого сплава МА2

Результаты пластометрических испытаний различных магниевых сплавов, полученные растяжением образцов на кулачковом пластометре, приведены на рис. 202, 203 и 204. Степень деформации при этих испытаниях оценивалась относительным сужением  $\psi$ , выраженным в процентах [10, 17].

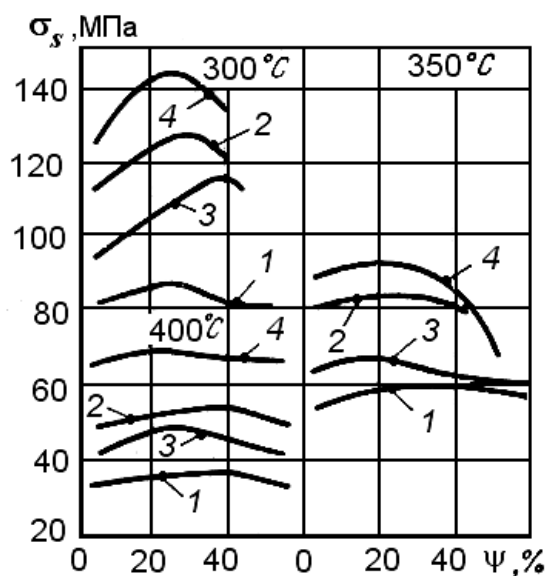


Рис. 202. Кривые деформационного упрочнения магниевого сплава МА2-1 (4,78 % Al; 0,5 % Mn; 0,98 % Zn). Скорость деформации,  $\text{с}^{-1}$ : 1 –  $4 \cdot 10^{-3}$ ; 2 –  $1,33 \cdot 10^{-2}$ ; 3 –  $4 \cdot 10^{-2}$ ; 4 –  $1,2 \cdot 10^{-1}$

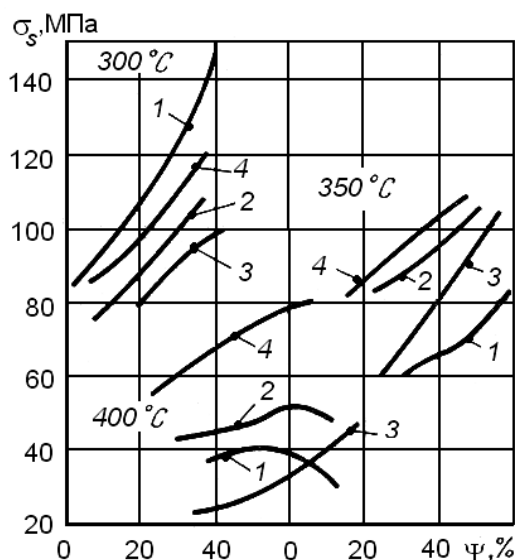


Рис. 203. Кривые деформационного упрочнения сплава МА8 (1,78 % Mn). Скорость деформации,  $\text{с}^{-1}$ : 1 –  $4 \cdot 10^{-3}$ ; 2 –  $1,33 \cdot 10^{-2}$ ; 3 –  $4 \cdot 10^{-2}$ ; 4 –  $1,2 \cdot 10^{-1}$



Кривые упрочнения магниевого сплава МАЗ, полученные пластометрическими испытаниями на различные виды осадки на кулачковом пластометре, приведены на рис. 205 [17].

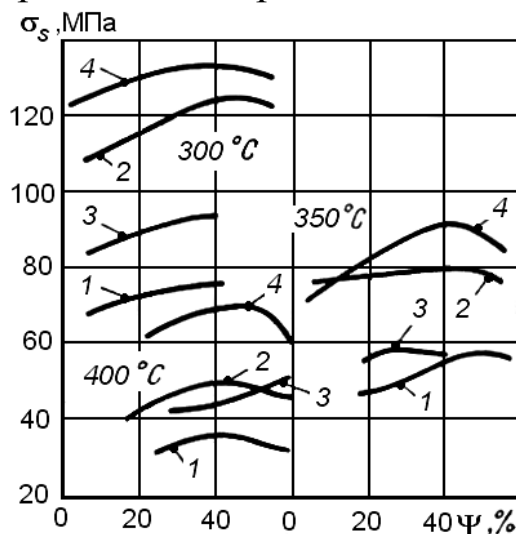


Рис. 204. Кривые деформационного упрочнения магниевого сплава BM65-1 (5,5 % Zn; 0,45 % Zr). Скорость деформации,  $\text{с}^{-1}$ : 1 –  $4 \cdot 10^{-3}$ ; 2 –  $1,33 \cdot 10^{-2}$ ; 3 –  $4 \cdot 10^{-2}$ ; 4 –  $1,2 \cdot 10^{-1}$

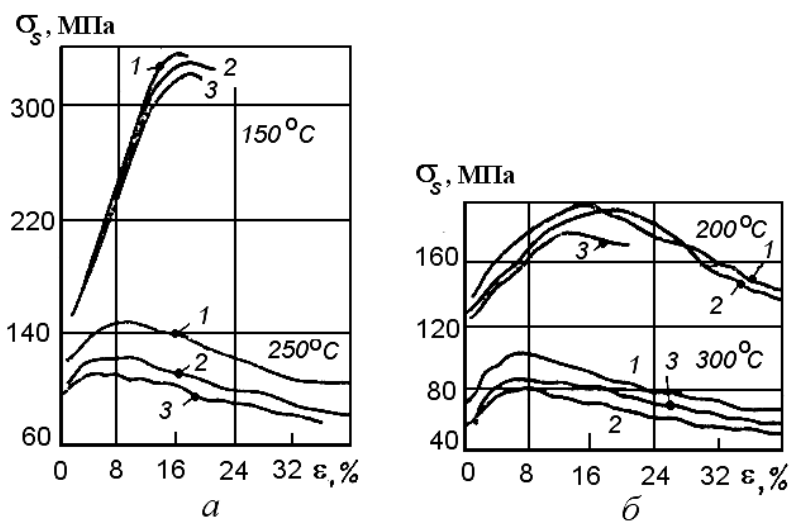


Рис. 205. Кривые деформационного упрочнения магниевого сплава МАЗ в условиях плоского (1), обычного (2) и линейного (3) сжатия [40]. Температура,  $^{\circ}\text{C}$ : а – 150-250; б – 200-300

## 7. Представление функций сопротивления деформации в виде аналитических зависимостей

Большинство кривых степенного упрочнения, полученных для случаев холодной деформации, имеют приблизительно один и тот же вид, показанный на рис. 206. При технологических расчетах обычно считают, что сопротивление холодной деформации определяется

только степенью деформации, представленной либо относительной деформацией  $\varepsilon = \Delta h/h_0$ , либо логарифмической деформацией  $\varepsilon = \ln h_0/h$ , либо степенью деформации сдвига  $\Lambda \approx \sqrt{3} \ln h_0/h$ . Несмотря на возможное влияние скорости деформации  $\dot{\varepsilon}$  на величину  $\sigma_s$  (или  $\sigma_{0,2}$ ), зависимость сопротивления деформации от скорости деформации не учитывают или рассматривают кривые степенного упрочнения при фиксированных  $\dot{\varepsilon}$ .

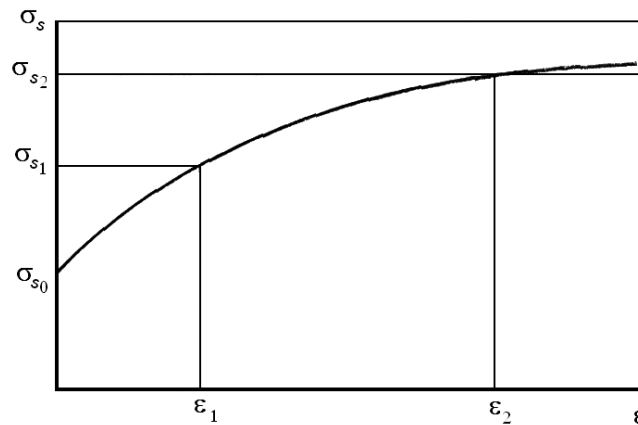


Рис. 206. Типовая кривая степенного упрочнения

Кривые степенного упрочнения вполне удовлетворительно аппроксимируются степенной функцией вида  $\sigma_s = \sigma_{s0} + a \cdot \varepsilon^b$ ,  $\sigma_{s0}$  — исходное значение сопротивления деформации, в общем случае рассматриваемое как  $\sigma_s$  после полного отжига металла; для любой рассматриваемой кривой степенного упрочнения  $\sigma_{s0} = \sigma_s|_{\varepsilon=0}$ ;  $a$  и  $b$  — эмпирические коэффициенты, определяемые для каждой конкретной кривой упрочнения.

Для определения коэффициентов задают два произвольных значения степени деформации, например  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$ , как показано на рис. 206. Поскольку для большинства процессов холодной деформации интервал рабочих значений степени деформации известен, значения  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  целесообразно совмещать с границами рабочего диапазона  $\varepsilon$ . Естественно, аппроксимирующая функция зависит от выбора значений  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  и редко может быть значительно экстраполирована за пределы  $[\varepsilon_1, \varepsilon_2]$ . Чем меньше различие между выбранными значениями  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$ , тем безопаснее для точности расчетов интерполяция между выбранными величинами степени деформации.

Выбранным значениям  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  соответствуют значения сопротивления деформации  $\sigma_{s1}$  и  $\sigma_{s2}$ . Для этих значений записывается система двух уравнений

$$\sigma_{s1} = \sigma_{s0} + a\varepsilon_1^b,$$

$$\sigma_{s2} = \sigma_{s0} + a\varepsilon_2^b,$$

из решения которой и определяются коэффициенты аппроксимации:

$$b = \ln \frac{\sigma_{s2} - \sigma_{s0}}{\sigma_{s1} - \sigma_{s0}} / \ln \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}, \quad a = \frac{\sigma_{s1} - \sigma_{s0}}{\varepsilon_1^b}.$$

При стремлении надежно описать с помощью степенной функции всю кривую степенного упрочнения оптимальные значения  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  на исследованном диапазоне  $\varepsilon$  определяют методом наименьших квадратов, минимизируя среднее квадратичное отклонение расчетных от опытных данных.

В качестве примера можно привести некоторые аппроксимирующие кривые степенного упрочнения для алюминиевых сплавов [41]:

сплав	функция
А00 –	$\sigma_{0,2} = 17,6 + 2,74\varepsilon^{0,74}$ МПа;
А1 –	$\sigma_{0,2} = 58,8 + 6,27\varepsilon^{0,62}$ МПа;
А2 –	$\sigma_{0,2} = 63,7 + 9,21\varepsilon^{0,59}$ МПа;
АМц –	$\sigma_{0,2} = 49,0 + 5,88\varepsilon^{0,71}$ МПа;
АМг1 –	$\sigma_{0,2} = 98,0 + 12,74\varepsilon^{0,59}$ МПа;
АМг3 –	$\sigma_{0,2} = 73,5 + 62,72\varepsilon^{0,3}$ МПа;
Д1 –	$\sigma_{0,2} = 86,2 + 34,3\varepsilon^{0,41}$ МПа;
Д16 –	$\sigma_{0,2} = 117,6 + 39,2\varepsilon^{0,31}$ МПа;
АМг5 –	$\sigma_{0,2} = 147,0 + 44,1\varepsilon^{0,42}$ МПа.

Сложнее подбирать (а иногда невозможно) достаточно простые и удобные для практического использования аналитические выражения, аппроксимирующие кривые упрочнения при горячей деформации, где необходимо кроме степени деформации учитывать влияние температуры и скорости деформации.

Широкое распространение, как наиболее простой и достаточно для технологических задач точный, получил метод термомеханических коэффициентов, предложенный В.И. Зюзиным и описанный, в

частности, в [41]. Метод позволяет расчленить многозначную функциональную зависимость сопротивления деформации  $\sigma_s(\varepsilon, t, \dot{\varepsilon})$  на ряд зависимостей между тремя переменными:  $K_t(t)$ ,  $K_\varepsilon(\varepsilon)$  и  $K_{\dot{\varepsilon}}(\dot{\varepsilon})$ , причем

$$K_t = \frac{\sigma_{ti}}{\sigma_0}; \quad K_\varepsilon = \frac{\sigma_{\varepsilon i}}{\sigma_0}; \quad K_{\dot{\varepsilon}} = \frac{\sigma_{\dot{\varepsilon} i}}{\sigma_0},$$

где  $K_t$ ,  $K_\varepsilon$ ,  $K_{\dot{\varepsilon}}$  – соответственно температурный, степенной и скоростной коэффициенты;

$\sigma_{ti}$ ,  $\sigma_{\varepsilon i}$  и  $\sigma_{\dot{\varepsilon} i}$  – соответственно функции сопротивления деформации в зависимости от температуры, степени и скорости деформации;

$\sigma_0$  – так называемое базисное значение, выбираемое произвольно, но желательно ближе к центру факторного пространства.

Базисному значению сопротивления деформации  $\sigma_0$  соответствует фиксированный базисный режим деформирования:  $\varepsilon_0$ ,  $t_0$ ,  $\dot{\varepsilon}_0$  – такой, что

$$\sigma_0 = \sigma_s|_{\varepsilon=\varepsilon_0; t=t_0; \dot{\varepsilon}=\dot{\varepsilon}_0}.$$

После определения функций термомеханических коэффициентов сопротивление деформации рассчитывается по простой формуле:

$$\sigma_s = \sigma_0 K_\varepsilon K_t K_{\dot{\varepsilon}}.$$

Процедура построения функций термомеханических коэффициентов рассматривается на примере аппроксимации типовых графиков функции  $\sigma_s = \sigma_s(\varepsilon, t, \dot{\varepsilon})$ , изображенных на рис. 207. Предполагается, что графики получены в результате пластометрических исследований конкретного металла или сплава в технологически оправданном диапазоне изменения степени деформации  $[\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_5]$ , температуры  $[t_1, \dots, t_4]$  и скорости деформации  $[\dot{\varepsilon}_1, \dots, \dot{\varepsilon}_5]$ . Для примера на графике рис. 207 произвольно установлен базисный режим деформирования:  $\varepsilon_0 = \varepsilon_3$ ;  $t_0 = t_3$ ;  $\dot{\varepsilon}_0 = \dot{\varepsilon}_3$ , которому соответствует базисное значение  $\sigma_0$  сопротивления деформации. Следовательно, в рассматриваемом случае

$$\sigma_0 = \sigma_s|_{\varepsilon=\varepsilon_3; t=t_3; \dot{\varepsilon}=\dot{\varepsilon}_3}.$$

Графики функций термомеханических коэффициентов  $K_\varepsilon$ ,  $K_t$  и  $K_{\dot{\varepsilon}}$  строятся в координатах соответственно  $\varepsilon$ ,  $t$  и  $\dot{\varepsilon}$ , как это показано на рис. 208. Естественно, что функция  $K_\varepsilon(\varepsilon)$  приобретает единичное

значение при  $\varepsilon = \varepsilon_0 = \varepsilon_3$ , функция  $K_t(t)$  – при  $t = t_0 = t_3$  и функция  $K_{\dot{\varepsilon}}(\dot{\varepsilon})$  – при  $\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_0 = \dot{\varepsilon}_3$ . Графики строятся по характерным точкам:  $a$ ,  $b$ ,  $v$  и т.д. Например, на графике функции  $K_{\varepsilon}(\varepsilon)$  координаты точки  $a$  по осям  $\varepsilon$  и  $K_{\varepsilon}$  равны

$$\varepsilon = \varepsilon_1; \quad K_{\varepsilon} = \sigma_s|_{\varepsilon=\varepsilon_1; t=t_3; \dot{\varepsilon}=\dot{\varepsilon}_3} / \sigma_0.$$

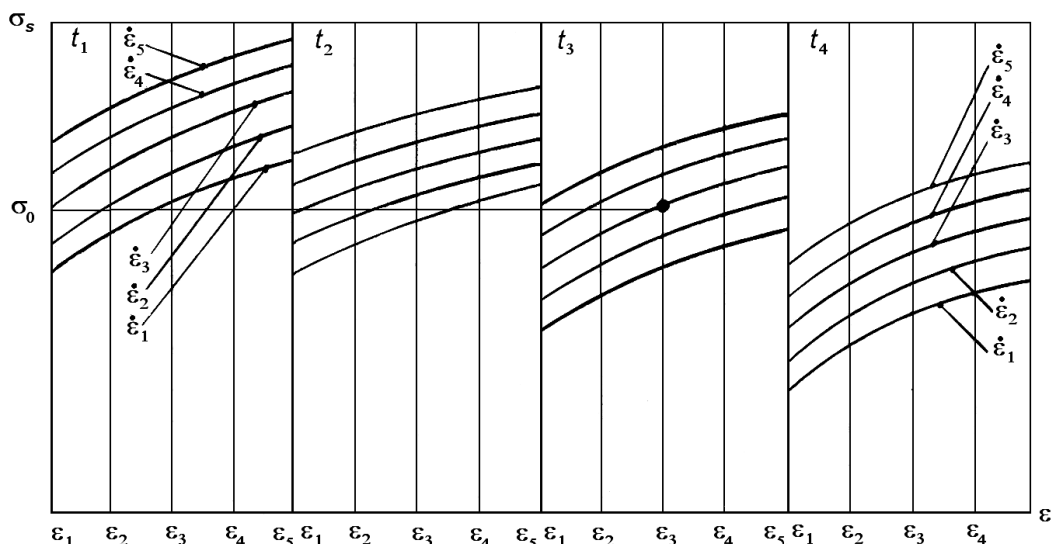


Рис. 207. Типовые графики функции  $\sigma_s = \sigma_s(\varepsilon, t, \dot{\varepsilon})$  сопротивления металла горячей деформации

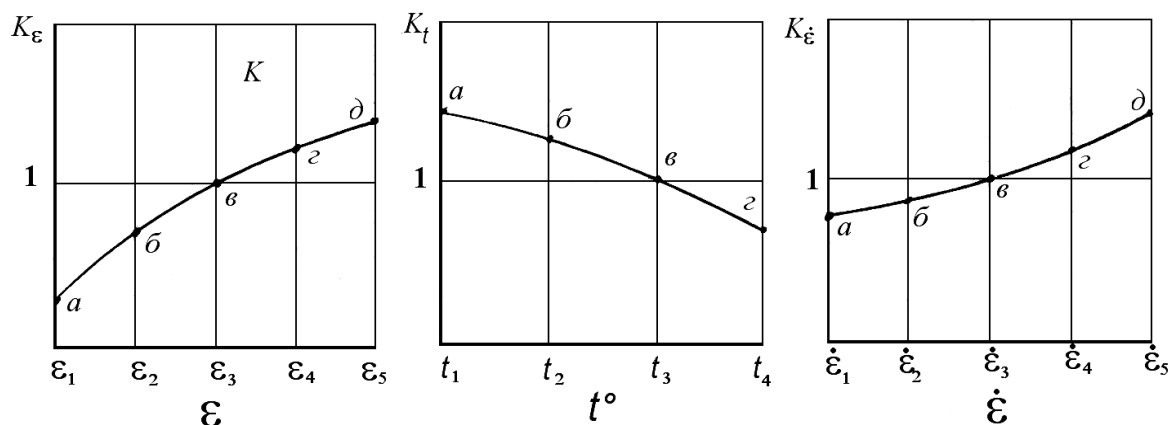


Рис. 208. Типовые графики функций термомеханических коэффициентов

Аналогично координаты точки  $b$  равны

$$\varepsilon = \varepsilon_2; \quad K_{\varepsilon} = \sigma_s|_{\varepsilon=\varepsilon_2; t=t_3; \dot{\varepsilon}=\dot{\varepsilon}_3} / \sigma_0$$

и так далее для всех остальных точек. График функции  $K_t(t)$  строится аналогичным образом: координаты точки  $a$  составляют

$$t = t_1; \quad K_t = \sigma_s|_{\varepsilon=\varepsilon_3; t=t_1; \dot{\varepsilon}=\dot{\varepsilon}_3} / \sigma_0,$$

точки  $b$

$$t = t_2; \quad K_t = \sigma_s|_{\varepsilon=\varepsilon_3; t=t_2; \dot{\varepsilon}=\dot{\varepsilon}_3} / \sigma_0 \text{ и т.д.}$$

Точки графика функции  $K_{\dot{\varepsilon}}(\dot{\varepsilon})$  имеют координаты:

точка  $a$   $\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_1$ ;  $K_{\dot{\varepsilon}} = \sigma_s|_{\varepsilon=\varepsilon_3; t=t_3; \dot{\varepsilon}=\dot{\varepsilon}_1} / \sigma_0$ ;

точка  $b$   $\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_2$ ;  $K_{\dot{\varepsilon}} = \sigma_s|_{\varepsilon=\varepsilon_3; t=t_3; \dot{\varepsilon}=\dot{\varepsilon}_2} / \sigma_0$  и т.д.

Практика построения подобных графиков показывает, что функция  $K_{\dot{\varepsilon}}(\dot{\varepsilon})$  из-за широкого диапазона изменения скорости деформации (практически от 0,01 до 200 с<sup>-1</sup>) существенно не линейна, но может быть приближена к линейной представлением её в виде  $K_{\dot{\varepsilon}}(\ln \dot{\varepsilon})$ . Все три полученных графика функций термомеханических коэффициентов могут быть, в свою очередь, аппроксимированы подходящими аналитическими зависимостями. В частности, В.И. Зюзиным предложено использовать экспоненциальные зависимости вида

$$K_t = A_1 e^{-m_1 t}; \quad K_{\varepsilon} = A_2 \varepsilon^{m_2}; \quad K_{\dot{\varepsilon}} = A_3 \dot{\varepsilon}^{m_3},$$

где  $A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 = A$  – постоянные коэффициенты, зависящие от конкретного вида опытных кривых упрочнения.

В итоге записывается общее уравнение для расчета сопротивления деформации

$$\sigma_s = \frac{A \varepsilon^{m_2} \dot{\varepsilon}^{m_3}}{e^{m_1 t}} \cdot \sigma_0.$$

Коэффициенты этой формулы определяются на ЭВМ для конкретных материалов. Вполне могут быть подобраны и более удачные аппроксимирующие функции для  $K_{\varepsilon}$ ,  $K_t$ , и  $K_{\dot{\varepsilon}}$ , позволяющие получить более удобную формулу для  $\sigma_s(\varepsilon, t, \dot{\varepsilon})$ .

В доступных литературных источниках, например [12], приводится много других видов аналитических выражений, аппроксимирующих кривые упрочнения. При малых деформациях в холодном и теплом состоянии сопротивление деформации удачно описывается уравнением Свифта:  $\sigma_s = A(B + \varepsilon)^C$ .

Значение коэффициентов  $A$ ,  $B$  и  $C$  для технического алюминия (99,5 % Al) приведены в табл. 47.

Известно аппроксимирующее уравнение Воке:

$$\sigma_s = A - (A - B) e^{-\frac{\varepsilon}{C}},$$

коэффициенты которого для той же марки технического алюминия приведены в табл. 48.

Таблица 47

Коэффициенты уравнения Свифта для технического алюминия

Температура, °C	$\dot{\varepsilon}$ , с <sup>-1</sup>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
200	212	131,2	0,118	0,317
	11,7	124,2	0,00357	0,212
	0,095	111,2	0,0173	0,237
20	213	171,3	0,00827	0,197
	11,0	159,0	0,00115	0,216
	0,113	159,8	0,026	0,304

Таблица 48

Коэффициенты уравнения Воке для технического алюминия (99,5 % Al)

Температура, °C	$\dot{\varepsilon}$ , с <sup>-1</sup>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
200	212	157	69,7	0,731
	11,7	12	53,0	0,285
	0,095	109	48,5	0,331
20	213,0	169	84,3	0,321
	11,0	154	64,6	0,284
	0,113	169,5	60,6	0,461

Эти два уравнения, несмотря на достаточно точную аппроксимацию кривых упрочнения, не получили широкого распространения из-за сложности определения коэффициентов.

Удачными считаются аппроксимации кривых упрочнения  $\sigma_s(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$  с помощью функции  $\sigma_s = \sigma_0 C_1 \varepsilon^{n_1} C_2 \dot{\varepsilon}^{n_2}$ , коэффициенты аппроксимации которых, а также значение  $\sigma_0$  приведены для некоторых алюминиевых сплавов в табл. 49.

Широко распространено в практике аппроксимирующее кривые упрочнения  $\sigma_s(\varepsilon, t, \dot{\varepsilon})$  выражение  $\sigma_s = \sigma_0 A_1 e^{-m_1 t} A_2 \varepsilon^{m_2} A_3 \dot{\varepsilon}^{m_3}$ , предложенное авторами [12]. Коэффициенты этого уравнения для алюминиевых сплавов приведены в табл. 50.

Таблица 49

Коэффициенты аппроксимации для алюминиевых сплавов

Сплав	Температура, °C	$\sigma_0$ , МПа	$C_1$	$C_2$	$n_1$	$n_2$
Al (99,5%)	20	100	1,289	0,959	0,183	0,018
	120	92	1,284	0,910	0,181	0,041
AMg3	20	214	1,215	1,030	0,142	-0,013
AMg4,5	20	293	1,170	1,039	0,128	-0,017
AMg1	20	265	1,168	0,985	0,114	0,007
AMg4	20	324	1,211	0,989	0,140	0,005
AMц	20	150	1,193	0,965	1,130	0,016

Таблица 50

Коэффициенты уравнения  $\sigma_s = \sigma_s(\varepsilon, t, \dot{\varepsilon})$  для сплавов алюминия

Сплав	$\sigma_0$ , МПа	$A_1$	$m_1$	$A_1$	$m_1$	$A_3$	$m_3$
Al 99,999	28,4	9,395	0,0056	1,098	0,041	0,698	0,156
Al 99,99	28,0						
Al 99,98	24,8						
Al 99,5	38,0	4,876	0,00396	1,490	0,173	0,775	0,111
Al 99,2	45,9						
Al 99	43,0						
AlMn	49,1						
AlMn1	47,1						
AlMg3	107,1	5,114	0,00429	1,134	0,055	0,815	0,089
AlMg4,5	150,6						
AlMg5	160,7						
AlMg6	130,5						
AlMgMn	103,6						
AlMg4,5Mn	109,0						
AlMgSi1	67,2						
AlZnMgCu1,5	127,3	5,693	0,00438	1,051	0,022	0,771	0,113
AlCuMg1	111,8						
AlCuMg2	127,5						
AlCuMg	123,4						
AlCu4Mg1,5Mn	169,1	6,504	0,00468	1,425	0,154	0,764	0,117
AlZn6Mg2Cu	169,7						
AlZn3Si3	149,0						
AlZn4Mg1,5Fe	118,3						
AlZn4Mg1,5Cu	106,9						



## 8. Разработка и создание нового торсионного пластометра

На основании проведенного обзора известных методов пластометрических испытаний, конструкций и принципов действия соответствующего оборудования, а также результатов исследований сопротивления деформации алюминиевых и магниевых сплавов можно сделать следующие выводы.

Наиболее универсальным методом пластометрических исследований признается метод кручения на торсионных пластометрах, позволяющий проводить испытания в широком диапазоне изменения всех влияющих на  $\sigma_s$  факторов – степени, скорости и температуры деформации. В качестве существенного недостатка этого способа изучения сопротивления деформации следует рассматривать невозможность точного определения сопротивления сдвиговой деформации при значительных углах скручивания сплошных образцов из-за невозможности предсказания закона распределения деформаций и напряжений в сечении образца. Особенно сложно определять  $\sigma_s$  при горячей деформации, поскольку скорость деформации сдвига всегда неоднородно распределена по радиусу сечения и изменяется от нуля в осевой зоне до максимальной – на поверхности образца. Испытание на кручение полых образцов не позволяет достигать больших деформаций из-за потери устойчивости стенки образца. Точность определения  $\tau_s$  на полых образцах растет с утонением стенки, однако при этом уменьшаются допустимые по условиям устойчивости углы скручивания и сдвиговые деформации.

Без сомнения, наиболее перспективен при испытаниях на кручение дифференциальный подход Мура. Но он не нашел до настоящего времени широкого распространения по причине недостаточной точности измерения крутящих моментов и трудности воспроизведения одинаковых условий деформирования на двух последовательно скручиваемых образцах разного диаметра. С увеличением разности диаметров упрощается замер крутящих моментов, уменьшается ошибка в определении разности крутящих моментов, но растет ошибка в определении  $\tau_s$  из-за неравномерности распределения деформаций и скоростей деформации по радиусу периферийного слоя образца большего диаметра.

Пластометрические испытания на растяжение и сжатие характеризуются сравнительно малыми степенями деформации из-за быстрого образования шейки при растяжении и из-за значительного влияния контактного трения на напряженно-деформированное состояние осаживаемого даже при хорошей смазке образца. Поэтому испытания на растяжение вполне пригодны для анализа степенного упрочнения металла при холодной деформации, когда по диаграмме растяжения удобно определять  $\sigma_s$  или  $\sigma_{0,2}$  металла с заданной степенью предварительного упрочнения, достигнутой в каком-либо процессе холодной пластической деформации (прокатки, волочения). Особенно перспективны испытания на растяжение при анализе анизотропии механических свойств, порожденной текстурами деформации. Проводить подобный анализ испытаниями на сжатие менее удобно вследствие сложности точного определения условного предела текучести. Горячие испытания на осадку на кулачковых пластометрах и копрах вполне успешны в диапазоне логарифмических деформаций до 0,8. При больших деформациях приходится осуществлять корректировку полученных значений  $\sigma_s$  с привлечением каких-либо гипотез.

Получение кривых упрочнения в диапазоне степеней деформации, характерных для процессов горячего прессования, в частности, алюминиевых сплавов, испытаниями на растяжение и сжатие принципиально невозможно. Если при горячем прессовании алюминия достигают вытяжек до 600, то оценкой степени деформации может служить логарифмическая деформация  $\varepsilon = \ln \lambda$ , где  $\lambda$  – вытяжка при прессовании. Следовательно, при прессовании алюминия логарифмическая деформация может достигать величин  $\varepsilon = \ln 600 = 6,4$ , что существенно превосходит деформации при испытании на осадку и тем более на растяжение. Поэтому, как следует из обзора результатов изучения сопротивления деформации алюминиевых и магниевых сплавов, степень деформации при пластических испытаниях либо вообще не учитывают, либо используют некоторые гипотезы о возможном поведении металла при больших деформациях.

Особое место при пластометрических исследованиях занимает изучение динамики процессов разупрочнения металла в паузах между этапами циклического деформирования. Уменьшение сопротивления деформации за счет полигонизации или рекристаллизации следует учитывать при многопроходной прокатке при свободной ковке и во всех процессах ОМД, где возможны технологические паузы между этапами горячего пластического деформирования. Чаще всего испы-

тания на циклическое деформирование с регламентированными по времени паузами проводят на кулачковых пластометрах либо за счет установки на маховик нескольких кулачков, либо за счет последовательного подъема кулачка после каждого акта деформации, либо за счет последовательного сближения бойков после каждого обжатия. Если циклические испытания осуществляются на растяжение, то при ограниченной величине полной деформации до появления шейки или до разрушения степень деформации в каждом цикле деформирования становится столь мала, что уже не соответствует величинам единичных обжатий в реальных процессах ОМД. Поэтому такие испытания на растяжение могут иметь лишь теоретическое значение и их следует признать малоинформативными для технологической практики. Испытания на сжатие (осадку) лишь незначительно расширяют диапазон суммарной степени деформации. Кроме того, с каждым очередным циклом деформации растет нагрузка за счет увеличения площади контактной поверхности образца, что приводит к быстрому исчерпанию запасенной кинетической энергии маховика. Многоцикловые пластометрические испытания на сжатие трудно выполнить при постоянных температурно-скоростных условиях.

Наиболее эффективно пластометрические испытания на многоцикловую деформацию с регламентированными паузами можно проводить на торсионных пластометрах, где в каждом цикле легко достичь сравнительно больших степеней сдвиговой деформации.

### **8.1. Вариант конструкции пластометра**

В основу разработки нового пластометра, позволяющего при проведении пластометрических исследований преодолеть большинство перечисленных трудностей и недостатков существующих и описанных методик и конструктивных исполнений установок, положена следующая концепция:

- используется пластометр торсионного типа;
- реализуется дифференциальный метод Мура испытания на кручение одновременно двух образцов различных диаметров;
- производится измерение разницы крутящих моментов скручивания двух образцов при равной температуре и скорости деформации;
- производится нагрев образцов электроконтактным способом, при этом питание на образцы подается с делителя напряжений, положе-

ние средней точки которого устанавливается автоматически контуром обратной связи по разности температур нагрева образцов;

- привод вращения активных захватов осуществляется от одного червячно-реечного привода;
- пластометр монтируется на универсальном токарно-винторезном станке; привод механизма вращения захватов от патрона станка;
- для осуществления режима циклического деформирования используются несколько установленных на заданном расстоянии червяков-реек;
- измерение разницы моментов кручения образцов осуществляется балочным торсиомером, подключенным к автоматической системе сбора и обработки информации на базе серийных ЭВМ и УСО (устройство связи с объектами).

Конструктивный вариант торсионного пластометра, монтируемого на станине универсального токарно-винторезного станка, представлен на рис. 209 и 210. Привод крутильных устройств пластометра осуществляется от патрона 1 токарного станка посредством винтовой пары: гайки 2, зажатой губками патрона, и винта 3. На средней цилиндрической части винта устанавливаются посредством шпоночных соединений рабочие червяки 4, разделенные между собой проставочны-

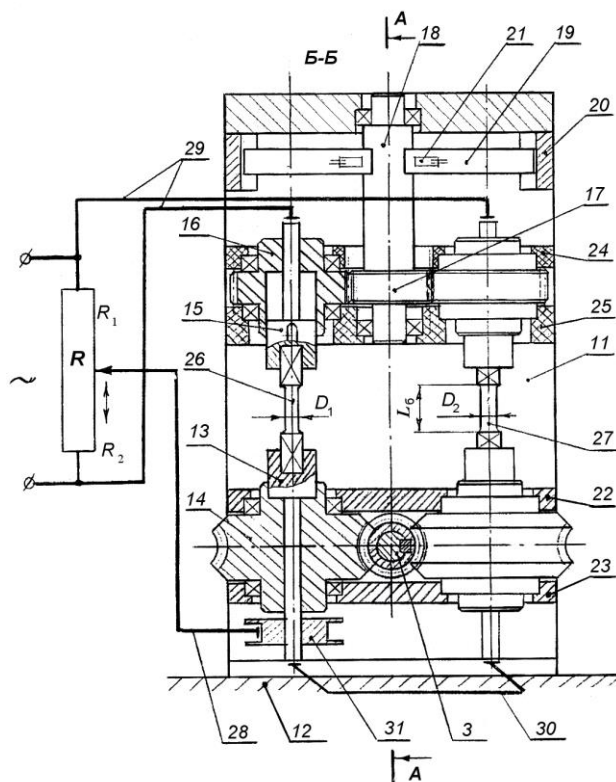


Рис. 209. Конструктивная схема торсионного пластометра (поперечный разрез)

ми втулками 5. Количество устанавливаемых червяков определяется количеством циклов деформирования во время испытания. На противоположном конце винта жестко крепится шлицевый вал 6 с установленной на нем с возможностью осевого перемещения втулкой 7, сопрягаемой наружной поверхностью с тормозными колодками 8 управляемого тормозного устройства. Осевое перемещение системы винт-шлицевый вал ограничено осевой шариковой опорой 9 и управляемой пинолью станка 10. Собственно пластометрическая установка смонтирована на стойке 11, жестко закрепленной на столе поперечного суппорта станка 12. В составе установки два активных захвата 13, приводимых во вращение от двух червячных колес 14, сопряженных с червяком 4. Пассивные захваты 15 с возможностью осевого смещения на шпонках установлены в корпусах шестерней 16, находящихся между собой в постоянном зацеплении посредством шестерни 17, жестко закрепленной на валу 18, угловое положение которого зафиксировано относительно стойки 11 балками 19 торсионметра. Свободные концы балок помещены в пазы кронштейна 20, закрепленного на стойке 11. В зоне действия максимального изгибающего момента балок 19 наклеены тензометрические датчики 21. Опоры вращения червячных колес 14 закреплены в кронштейнах 22 и 23 стойки 11, а опоры шестерен 16 – в кронштейнах 24 и 25. Последние и шестерня 17 изготовлены из неэлектропроводного материала или из материала с высоким омическим сопротивлением. Испытуемые образцы различных диаметров  $D_1$  и  $D_2$  и равной базовой длины  $L_6$  закрепляются в захватах 13 и 15 с обеспечением надежного электрического контакта. Электропроводные стержни захватов выведены за пределы корпусов червячных колес 14 и шестерен 16 для крепления к ним шин 28, 29 и 30 электропитания. Шина 30, исполняющая роль перемычки, имеет торцевые крепления и представляет собой гибкий многожильный провод, вращающийся при встречном вращении активных захватов 13. Шина 28 токоподвода к вращающимся захватам наматывается на приемный барабан 31 во время испытания и разматывается при переводе пластометра в исходное состояние. Поскольку пассивные захваты 15 не вращаются при испытаниях, крепление токоподводящих шин 29 к стержням захватов жесткое.

Пластометрическая установка торсионного типа, осуществляющая испытания на кручение по дифференциальному методу Мура (изображена схематично на рис. 209 и 210), может работать в трех режимах:

- режиме реечного привода;
- режиме червячного привода;
- смешанном режиме привода.

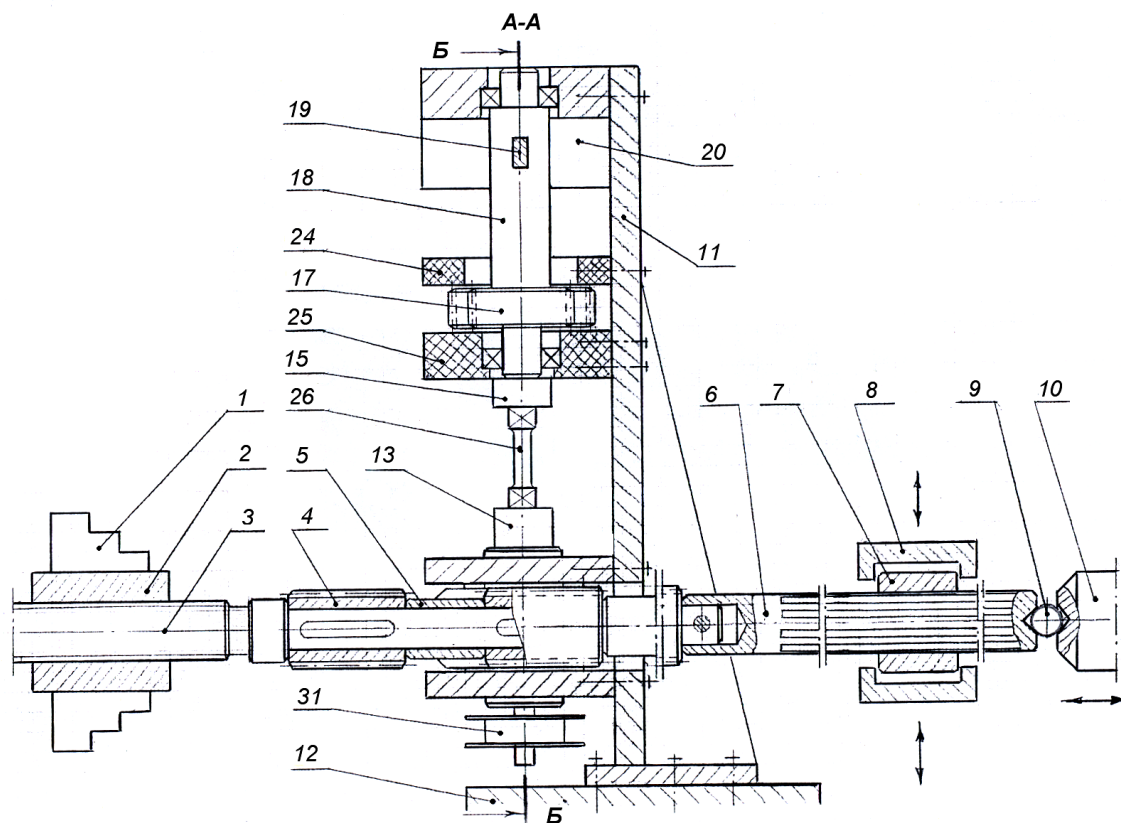


Рис. 210. Конструктивная схема торсионного пластометра (продольный разрез)

В соответствии с программой испытаний устанавливается посредством коробки передач станка требуемая частота вращения шпинделя и патрона 1 и зажатой в нем гайки 2. На рабочей части винта 3 расположены червяки в количестве, равном запланированному числу циклов деформации. Между червяками устанавливаются проставки 5, длина которых определяется длительностью паузы между этапами деформирования.

В исходном положении пиноль 10 подведена к торцу шлицевого вала 6 и шарик 9 ограничивает перемещение системы винт-шлицевый вал, которая в исходном состоянии занимает такое осевое положение, при котором червячные колеса выведены из зацепления с крайним червяком. Колодки 8 тормозного устройства разведены. Образцы 26 и 27 зажимаются в захваты; перед этим пассивные захваты 15 поднимаются вверх, устанавливаясь в корпусах шестерен 16. Включается электропитание на делитель напряжений  $R$ , и осуществляется электроконтактный нагрев образцов. Температура измеряется инфракрасными пирометрами. В качестве сигнала используется разница в тем-

пературах нагрева образцов, которая с помощью отрицательной обратной связи отрабатывается сервоприводом ползуна делителя напряжений. После установления оптимального соотношения сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$  и выхода температуры на заданный программой испытаний уровень пластометр готов для проведения испытаний.

В режиме реечного привода при сравнительно малых скоростях деформации и фиксированных (при установленной частоте вращения патрона) паузах между циклами деформации после приведения во вращение шпинделя и патрона 1 станка отводится пиноль 10 и включается тормозное устройство, прижимая колодки 8 к наружной поверхности втулки 7. После торможения втулки 7 и вала 6, жестко закрепленного с винтом 3, последний начинает двигаться в осевом направлении и червяки, последовательно проходя между червячными колесами 14, сообщают им вращательное движение. Образцы скручиваются на угол, определяемый передаточным числом червячной передачи и длиной нарезной части червяка. Червяки в этом случае двигаются с постоянной скоростью и выполняют функцию реек. Длина проставок 5 при данной осевой скорости винта 3 однозначно определяет длительность пауз, в течение которых осуществляется сначала динамическое, а затем и статическое разупрочнение (релаксация).

Режим червячного привода активных захватов используется при одноцикловом испытании на кручение. Для его осуществления между червячными колесами 14 устанавливается любой из червяков 4. Для установки червяка в рабочую позицию отводится пиноль 10 и включается тормозное устройство 8. При вращении шпинделя в соответствующем направлении смещают винт в осевом направлении до установки червяка между червячными колесами в симметричном положении.

Для проведения испытания включается тормозное устройство 8, а пиноль 10 подводится до упора в торец шлицевого вала. Кручение обоих образцов осуществляется после включения привода станка и завершается при его отключении.

Смешанный режим привода реализуется при программном управлении работой тормозного устройства и привода пиноли. При этом скорость скручивания образцов определяется частотой вращения червяков, а длительность паузы – скоростью осевого перемещения винта.

В момент осуществления кручения образцов электропитание отключается для исключения влияния электрического поля в образцах на результаты замера крутящего момента.

Таким образом, пластометр торсионного типа описанной конструкции позволяет проводить пластометрические исследования во всем практически используемом диапазоне изменения термомеханических параметров, определяющих величину сопротивления деформации.

## **8.2. Реализованная на базе токарного станка конструкция торсионного пластометра**

Спроектированный и изготовленный в условиях лаборатории кафедры «Обработка металлов давлением» УГТУ-УПИ ротационный пластометр предназначен для проведения пластометрических испытаний алюминиевых сплавов в диапазоне температур от 20 до 500<sup>0</sup>С и скоростей деформации от 0,007 до 1,0 с<sup>-1</sup>. Степени деформации сдвига, представляемые относительным углом скручивания образцов, ограничиваются только пластичностью металла при показателе напряженного состояния  $\sigma/T = 0$ , где  $\sigma$  – среднее гидростатическое напряжение,  $T$  – интенсивность касательных напряжений.

Сравнительно малые скорости деформации характерны для пластической обработки алюминиевых сплавов, для которых типична малая скорость динамического разупрочнения. Чем сложнее легирование алюминия, тем в большей степени при ковке и прессовании снижают скорости деформирования. Малые скорости деформации предотвращают разрушение заготовок, чаще всего обрабатываемых давлением из литого состояния, а также способствуют снижению энергосиловых параметров процессов.

Пластометрические испытания на кручение позволяют определять сопротивление деформации сплавов при больших степенях деформации, которые в производстве реализуются при прессовании, ковке и в некоторых операциях штамповки. Растяжением и сжатием трудно, а чаще всего невозможно описать влияние больших деформаций на величину  $\sigma_s$ . Поэтому при проектировании техпроцессов прессования иковки приходится на гипотетическом уровне принимать либо независимость  $\sigma_s$  от  $\varepsilon$  (или  $\Lambda$ ), либо произвольно назначать некоторое уменьшение сопротивления деформации при больших обжатиях.



Каждый сплав и, в частности, алюминиевый характеризуется своей скоростью динамического разупрочнения, определяющей интенсивность процессов полигонизации, динамической рекристаллизации и диффузии. Когда эта скорость мала, приходится уменьшать скорость деформации, чтобы сохранять пластичность металла на приемлемом для конкретного процесса ОМД уровне. Однако степень деформации существенно влияет на скорость динамического разупрочнения, поскольку при больших деформациях создается большое количество дефектов кристаллического строения, являющихся центрами перекристаллизации. Следовательно, реализуя интенсивные деформации, можно увеличивать скорость деформирования и поднимать производительность процессов без риска разрушения заготовок. Пластометрические исследования на больших степенях деформации позволяют определить допустимые для конкретных сплавов скорости обработки и выяснить реальную производительность процессов.

Большое значение имеет пластометрия при больших деформациях для формирования изотропных или регламентировано анизотропных механических характеристик изделий, получаемых горячей пластической деформацией. Если скоростное упрочнение превалирует над динамическим разупрочнением, то при больших деформациях формируется «острая» текстура деформации, которая в дальнейшем при отжиге или нагреве под закалку формируется в текстуру рекристаллизации, которая проявится в существенной анизотропии механических свойств изделия. Чтобы правильно выбрать скоростные условия деформирования для формирования заданных свойств изделий, необходимы количественные соотношения между скоростями упрочнения и динамического разупрочнения. Если такой информации нет, то либо получают некачественные изделия из-за текстурирования металла, либо проигрывают в производительности. Эта информация может быть получена лишь при пластометрических испытаниях.

Торсионные пластометры до настоящего времени получили малое распространение, поскольку изучение сопротивления деформации при больших скоростях затруднено. Большинство металлов и сплавов обрабатывается с большой скоростью деформации, поэтому для них наиболее пригодны кулачковые пластометры. Чтобы достичь большой скорости деформации при кручении приходится уменьшать базовую длину  $l_0$ . Но при этом на точность результатов начинает оказывать влияние «концевой эффект», т.е. существенная неравномерность распределения сдвиговых деформаций по длине образца.

Для алюминиевых сплавов, где большие скорости деформации не представляют практического интереса, испытания удобнее всего проводить именно на торсионных пластометрах.

Еще одним препятствием к широкому использованию испытаний на кручение является неравномерность распределения степени и скорости деформации по сечению скручиваемого образца. Кручение всегда, даже при больших углах скручивания  $\varphi$ , остается упруго-пластическим. Граница между упругой и пластической зонами не известна, так как она определена напряжением, равным  $\tau_s$ , которое и должно быть определено в ходе испытания. Следовательно, замер крутящего момента при кручении образца сплошного сечения дает лишь гипотетическое представление о величине  $\tau_s$  и  $\sigma_s$ . Кручение полых тонкостенных образцов позволяет достаточно точно найти величину сопротивления сдвиговой деформации, но оно мало интересно из-за малых углов скручивания и, следовательно, малых деформаций сдвига, которые могут быть достигнуты до момента потери устойчивости стенки образца. Чем тоньше стенка, тем точнее результат определения  $\tau_s$  и тем меньше достижимая величина относительного угла скручивания, который характеризует степень деформации сдвига.

Разработанная конструкция торсионного пластометра реализует дифференциальный метод при одновременном испытании двух образцов. Скручивание образцов производится на один и тот же угол одновременно, т.е. с одинаковой скоростью деформации. Крутящие моменты, приложенные к захватам образцов, не измеряются. Производится лишь замер разности крутящих моментов  $\Delta M$ .

Величина  $\tau_s$  при одновременном кручении двух разновеликих по диаметру образцов оценивается средним значением тангенциальных напряжений  $\tau_{cp}$  в поверхностном цилиндрическом слое образца

диаметром  $d_1$  при толщине этого слоя 
$$\delta = \frac{d_1 - d_2}{2}.$$

Чем меньше  $\delta$ , тем точнее оценка  $\tau_s$  величиной  $\tau_{cp}$ . Однако малым величинам  $\delta$  соответствуют и малые значения  $\Delta M$ , которые могут оказаться соизмеримыми с ошибкой измерения разности моментов кручения образцов.

При проведении пластометрических испытаний на новом пластометре в качестве оценки степени деформации сдвига используется относительный угол скручивания

$$\gamma = \frac{\pi(d_1 + d_2)}{2l_0} \cdot \frac{\varphi}{360^\circ},$$

где  $\varphi$  – угол взаимного разворота сечений рабочей части образца на базовой длине  $l_0$ , град.

Эквивалентная осевая степень деформации может быть представлена как  $\varepsilon = \frac{\gamma}{\sqrt{3}}$ . А скорость деформации  $\xi = \frac{\varepsilon}{\tau}$ , где  $\tau$  – время скручивания образцов на угол  $\varphi$ .

Поскольку торсионный пластометр использует привод универсального токарно-винторезного станка, то скорость деформации задается числом оборотов в минуту шпинделя станка при соответствующей настройке коробки передач. Червяк приводится во вращение патроном станка, а активные захваты пластометра червячными колесами, сопряженными с червяком. В таком случае время, с, скручивания образцов на угол  $\varphi$ , выраженный в градусах, равно

$$\tau = \frac{\varphi i}{6N},$$

где  $i$  – передаточное число червячных пар привода активных захватов;

$N$  – частота вращения шпинделя станка, об/мин.

Таким образом, скорость деформации при пластометрических испытаниях на разработанном пластометре составляет, с<sup>-1</sup>

$$\xi = \frac{\pi(d_1 + d_2)N}{120 \cdot \sqrt{3} \cdot i \cdot l_0} \approx 0,015 \cdot \frac{(d_1 + d_2)}{l_0} \cdot \frac{N}{i} = 0,03 \cdot \frac{d_{\text{ср}}}{l_0} \cdot \frac{N}{i},$$

где  $d_{\text{ср}} = \frac{(d_1 + d_2)}{2}$ .

Паспортный набор скоростей станка 1А616, на который устанавливается созданная пластометрическая установка, приведен в табл.51.

Передаточное число червячных пар привода активных захватов определяется кроме отношения делительных диаметров числом заходов червяка. В изготовленном пластометре предусмотрена возмож-

Набор скоростей станка 1А616,  $n$ , об/мин

I	II	I	II
9	-	71	560
11,2	-	90	710
18	-	112	900
28	-	140	1120
45	355	180	1400
56	450	224	1800

ность установки червячных пар с передаточными числами  $i=13$  (при двухзаходном червяке) и  $i=6,5$  (при четырехзаходном). Следовательно, минимальная скорость деформации на образцах диаметром от 10 до 12 мм и длиной  $l_0=30$  мм составляет,  $\text{с}^{-1}$

$$\xi_{\min} = 0,015 \cdot \frac{(10+12)}{30} \cdot \frac{9}{13} = 7,6 \cdot 10^{-3},$$

а максимально возможная по кинематическим параметрам –

$$\xi_{\max} = 0,015 \cdot \frac{(10+12)}{30} \cdot \frac{1800}{6,5} = 3,04.$$

При  $\xi_{\max}$  и скручивании образцов на один оборот ( $\varphi = 360^\circ$ ) длительность испытания составляет  $\tau = 0,1$  с. Поскольку это время соизмеримо с временем срабатывания электромагнитной муфты в линии привода ( $\tau_m = 0,06$  с) к времени разгона шпинделя станка на скольжении в муфте ( $\tau_c = 0,05$  с), испытания с такой скоростью деформации на образцах с  $l_0/d_{\text{ср}} \geq 3$  при сравнительно малых степенях деформации не могут дать достоверные результаты. Например, при  $l_0/d_{\text{ср}} = 3$  и  $\varphi = 360^\circ$  степень деформации  $\varepsilon = 0,665$ . Без увеличения скорости вращения шпинделя станка  $N$  повышение скорости деформации может быть достигнуто за счет уменьшения  $l_0/d_{\text{ср}}$ . Так, при  $l_0/d_{\text{ср}} = 1$  та же скорость деформации  $\xi = 3 \text{ с}^{-1}$  достигается в настройке  $i = 6,5$  при числе оборотов шпинделя  $N = 650$  об/мин. Снижение  $N$  всегда связано с уменьшением длительности переходного процесса в приводе шпинделя станка. Уменьшать длину рабочей части образца до значений  $l_0/d_{\text{ср}} < 1$  нецелесообразно из-за локализации сдвиговых деформаций и снижения точности задания параметров деформирования. При  $N = 650$  об/мин и  $i = 6,5$  скручивание образцов на один оборот осуществляется за время  $\tau = 0,6$  с и время переходного процесса со-

ставляет около 10 % от времени деформирования со степенью  $\varepsilon = 0,665$ . При этом в случае использования образцов с  $l_0/d_{\text{ср}} = 3$  скорость деформации  $\xi = 1,0 \text{ с}^{-1}$ . Диапазон скоростей деформации от 0,007 до  $1,0 \text{ с}^{-1}$  при использовании сравнительно длинных образцов можно считать пригодным для проведения пластометрических испытаний на новой установке с получением достаточно надежных результатов по определению сопротивления деформации алюминиевых сплавов.

### **8.2.1. Описание конструкции пластометра**

Конструкция торсионного пластометра оригинальна, не имеет аналогов в мировой практике; представлена на рис. 211-214 сборочными чертежами. Пластометр монтируется на станине токарного станка модели 1А616 с асинхронным приводом мощностью 5,5 кВт и с электромагнитным фрикционным подключением шпиндельной группы передней бабки. Все исполнительные элементы пластометра монтируются на двух стойках 5, неподвижно установленных посредством резьбовых соединений на суппорте 3, который в нижней части имеет опорные поверхности, соответствующие конфигурации направляющих станины станка. Суппорт 3 жестко закрепляется в определенном положении по отношению к патрону с помощью ригеля 1 и болтов 4. Угловое положение стоек в расточках суппорта фиксируется болтами 2.

Механизм привода активных захватов помещен в корпусе, собранном из двух нижних поперечин 23 и опирающемся снизу на опору 19, а сверху – на проставочные втулки 49. Механизм состоит из червяка 29, сопряженного одновременно с двумя одинаковыми червячными колесами 10. Последние посредством шпоночного соединения установлены на осях 11, выполняющих одновременно роль вращающихся (активных) захватов. Оси установлены с возможностью вращения в радиально-упорных подшипниках 8 в расточках нижних поперечин 23, которые, в свою очередь, установлены неподвижно на стойках 5. Для установки всего механизма привода на стойках 5 в нижних поперечинах предусмотрены отверстия под скользящую посадку на цилиндрические поверхности стоек. Неподвижные обоймы подшипников 8 поджимаются и фиксируются фланцами 12. В нижней части механизма привода активных захватов установлена медная контактная пластина 24, прижимаемая к нижней поперечине 24 контактными фланцами 6. В расточках этих фланцев, замыкаемых хво-

стовиками осей 11 и уплотнительными кольцами 26, помещена уплотнительная медно-графитовая порошковая набивка, обеспечивающая подвижный электрический контакт между медными осями 11 и контактной пластиной 24. В верхних хвостовиках осей 11 выполнены диаметрально пазы, обеспечивающие установку плоскоовальных головок образцов 21 с посадкой по плоскостям H8/j<sub>7</sub>. На резьбовых хвостовиках установлены зажимные гайки 13.

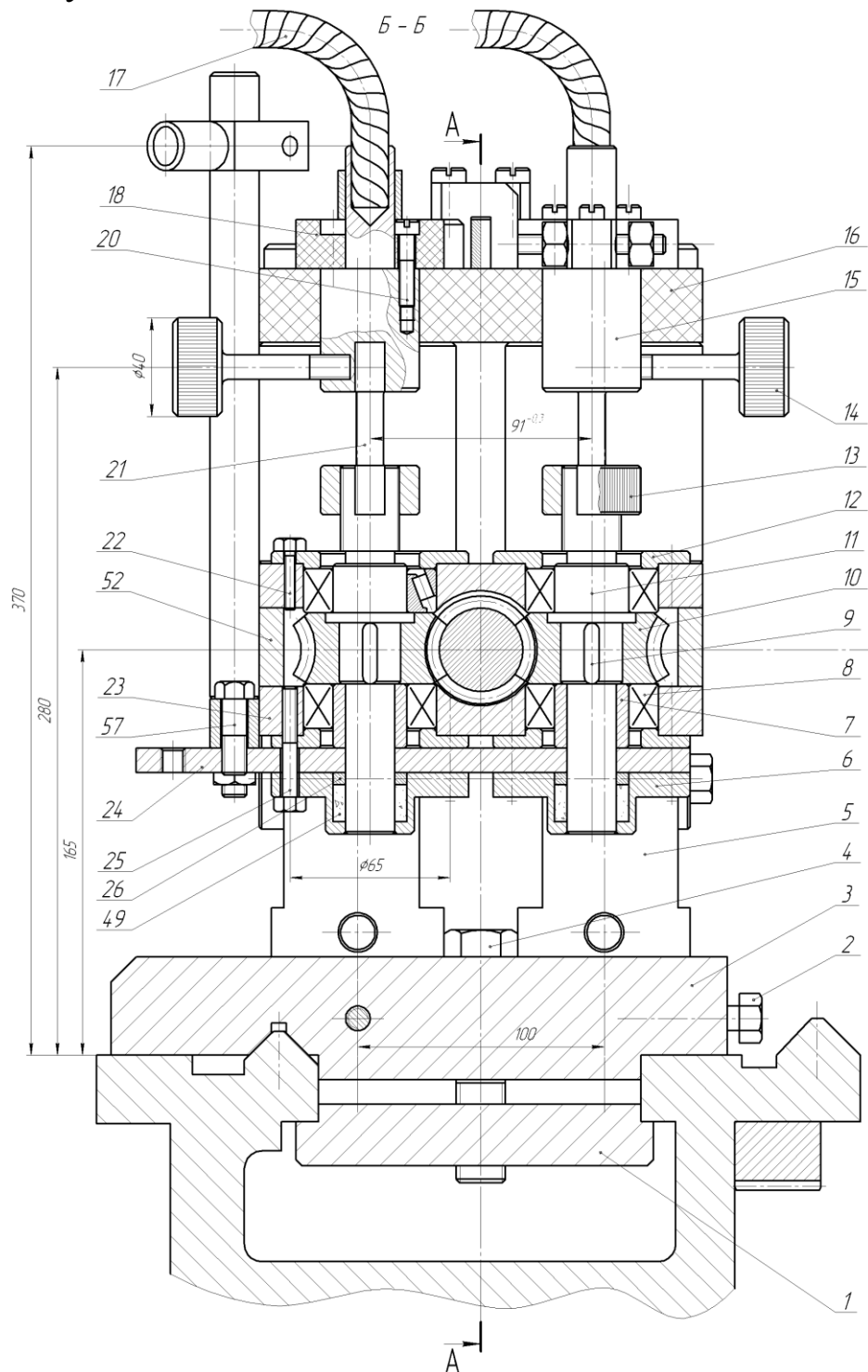


Рис.211. Поперечный разрез пластометра

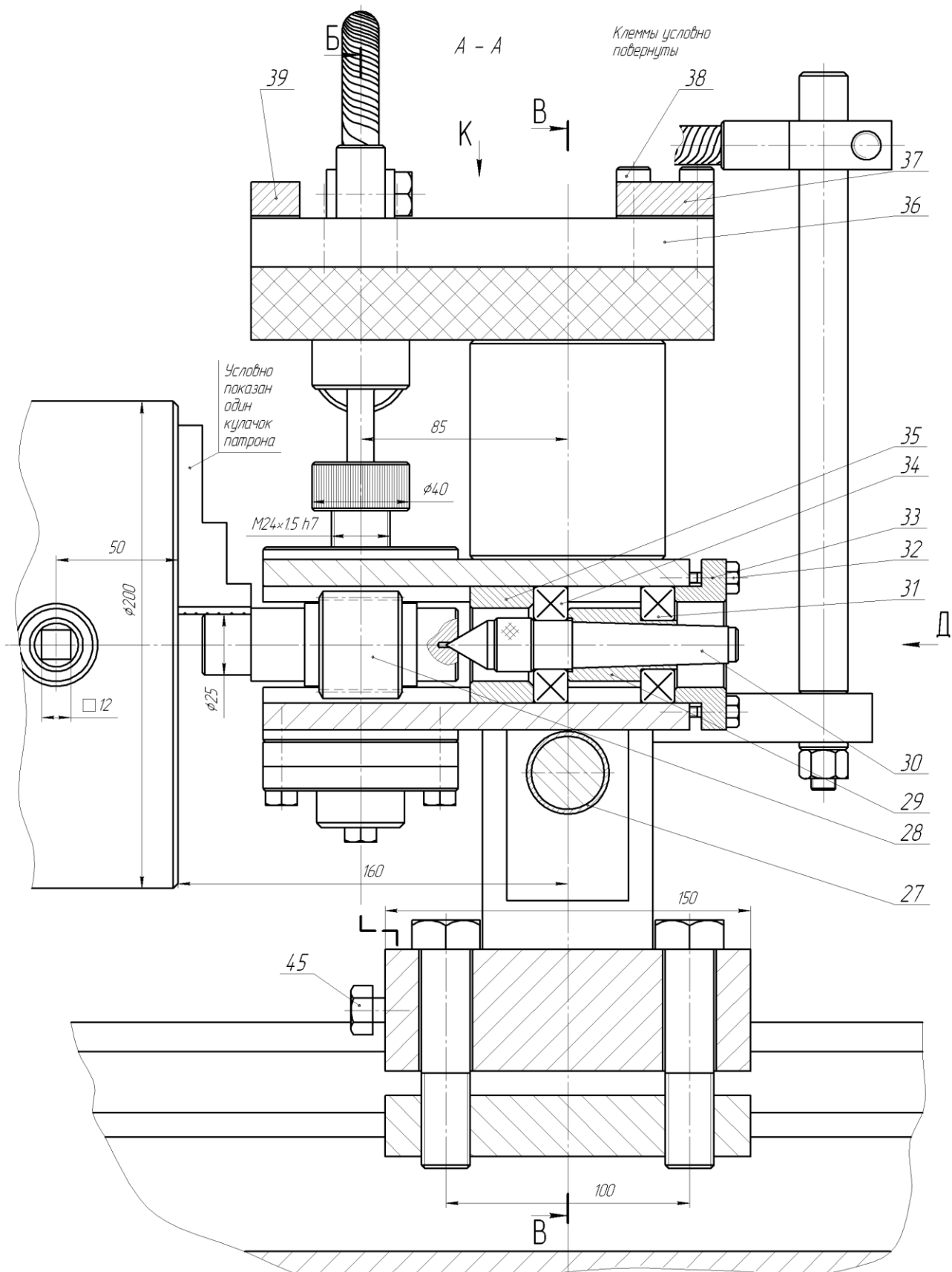


Рис. 212. Продольный разрез пластометра

Червяк 28 одним хвостовиком помещен в кулачки токарного патрона, а с противоположного конца поджат вращающимся в подшип-

никах 31 и 35 центром 30. Осовой подпор червяка 28 центром 30 достигается за счет фланца 33 нижней поперечины. Червяк 28, распорная втулка 35 и узел установки центра помещены в радиальные расточки нижних поперечин 23.

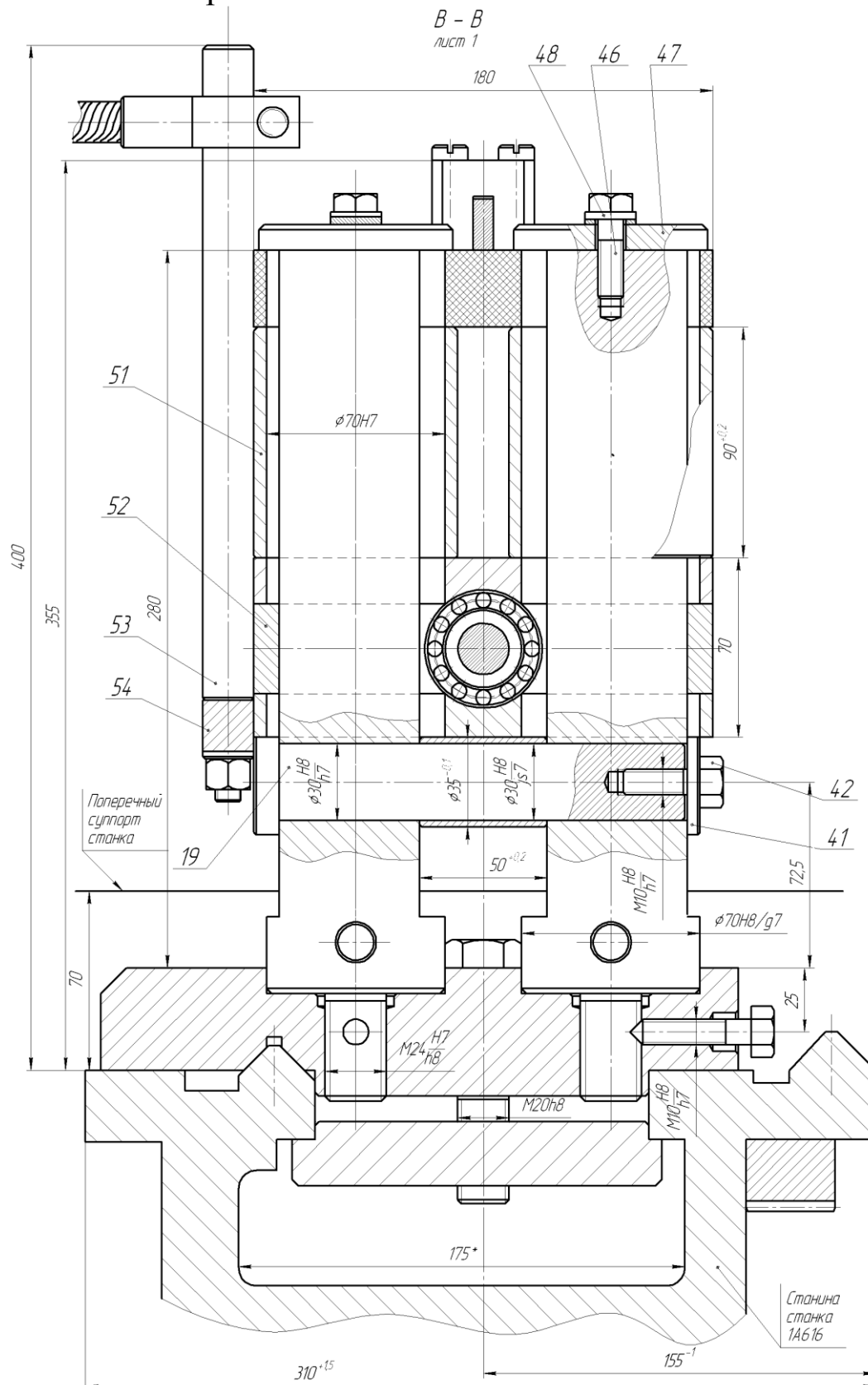


Рис. 213. Поперечный разрез В-В пластометра





крепления пайкой токоподводящих шин 17, сплетенных из гибкого многожильного провода марки ПЩС. Для закрепления головок образцов и обеспечения надежного электрического контакта образцов с верхними захватами в корпусах последних установлены винты 14.

На верхней плоскости поперечины 16 смонтировано силоизмерительное устройство, включающее рычаги 18, закрепленные винтами на торце захватов 15, упорные винты 40 и балочную мессдозу 36, жестко закрепленную одним концом в заднем кронштейне 37, прикрепленном винтами 38 к поперечине 16. На переднем конце балочной мессдозы 36 помещен кронштейн 39, в резьбовых отверстиях которого установлены винты 40, свободная часть винтов пропущена через отверстия в кулачках рычагов 18. Передний конец мессдозы 36 вместе с кронштейном 39 может упруго смещаться под действием сил, приложенных к винтам 40 со стороны кулачков рычагов 18. Винты 40 снабжены опорными гайками 43, в торцы которых упираются рабочие радиальные поверхности кулачков. Тензометрические датчики наклеены на боковые поверхности балочной мессдозы 36 в непосредственной близости от места заземления балки задним кронштейном 37.

Нагрев образцов осуществляется электроконтактным способом, причем конструкция пластометра предусматривает возможность как параллельного, так и последовательного подключения пластометра к шинам вторичной обмотки трансформатора. В первом случае провода 17 соединяются с одной шиной, а пластина 24 – с другой, во втором случае – провода 17 присоединяются к шинам трансформатора.

На верхнем торце стяжных шайб 47 монтируются пластины 50, выполняющие функцию измерения температуры образцов по величине теплового удлинения. Одним концом измерители 50 заземлены с помощью болтов 46 между шайбами 47 и 48; противоположные концы пластин введены на глубину 5 мм в тангенциальные пазы, прорезанные в рычагах 18. Тензометрические датчики для замера деформации изгиба пластин 50 наклеены в зоне заземления (место наклейки датчиков показано на разрезе И-И сборочного чертежа).

Система шунтирования образца меньшего диаметра включает стальной стержневой шунт 53, жестко закрепленный на ригеле 54, электрически и механически связанном с контактной пластиной 24. В верхней части шунта с возможностью осевого смещения установлена зажимная клемма 55. Вторая идентичная клемма установлена на хво-

стовике верхнего захвата 15. Клеммы между собой соединены гибким многожильным проводом.

Испытания на кручение с целью определения сопротивления деформации по дифференциальному методу на новом торсионном пластометре проводятся в следующем порядке.

Пластометр в сборе устанавливается суппортом 3 на направляющие станины токарного станка 1А616 и неподвижно закрепляется ригелем 1 посредством затяжки болтов 4 в позиции, когда хвостовик червяка 28 помещен в зону зажима кулачков токарного патрона.

Образцы из испытываемого сплава изготавливаются с длиной рабочей части  $l_0 = 30$  мм. Диаметры образцов различны и находятся в диапазоне от 10 до 12 мм. Целесообразно принимать разность диаметров рабочих частей образцов не менее 1 мм. После изготовления и полировки рабочей части определяются диаметры  $d_1$  и  $d_2$  с точностью  $\pm 0,01$  мм.

Для установки образцов в захваты пластометра гайки 13 скручиваются вниз до упора, извлекаются винты 14, ослабляются винты 40 и верхние захваты 15 вместе с рычагами 18 и передним кронштейном 39 поднимаются на длину головки образца (20 мм). Образцы нижней головкой вводятся в пазы активных захватов 11, гайки 13 закручиваются вверх до зажима головок образцов. При отключенном переборе станка ручным поворотом патрона верхние головки ориентируются по отношению пазов верхних захватов, которые затем опускаются до упора в торцы образцов. Верхние головки образцов фиксируются в верхних захватах винтами 14. Винты 40 поджимаются до упора в месдозу 36, а гайки 43 устанавливаются в упор кулачков рычагов 18. При этом в случае прямого вращения шпинделя станка в упор ставятся внутренние гайки, а при обратном вращении – наружные гайки винтов 40. Далее включается перебор шпинделя станка и на коробке передач устанавливается предписанная программой испытаний частота вращения шпинделя станка. Пластометр готов для проведения испытаний образцов на кручение.

Поскольку при последовательном подключении образцов к вторичной обмотке трансформатора сила тока в образцах одинакова, то плотность тока различна из-за разных площадей поперечного сечения рабочих частей, определяемых диаметрами  $d_1$  и  $d_2$ . Если  $d_1 > d_2$ , то плотность тока во втором образце выше и, следовательно, скорость нагрева также выше. Этот образец (с диаметром  $d_2$ ) нуждается в

шунтировании, осуществляемом параллельным подключением титанового шунта, который жестко закреплен на ригеле 54, установленном на контактной пластине 24. Поскольку предусмотрена возможность смещения клеммы 55 вдоль шунта 53, сопротивление шунтирующей цепи настраивается для выравнивания плотностей тока в образцах. Для настройки шунта в начальный период нагрева подается сравнительно низкое напряжение на первичную обмотку трансформатора (3...5 В). При настройке температура образцов определяется по их удлинениям за счет теплового линейного расширения, замеряемого тензодатчиками, наклеенными на пластины 50. Пластины, закрепленные одним концом между шайбами 47 и 48, изгибаются при смещении вверх верхних захватов. Коэффициенты теплового расширения каждого испытуемого сплава определяются замерами удлинения нормализованных стержневых образцов при их печном контролируемом нагреве. Тензометрические измерители температуры 50 тарируются в функции перемещения свободных концов пластин. При проведении тарировки используется специальное микрометрическое приспособление.

Электропитание для осуществления контактного нагрева образцов обеспечивается от трансформатора таммановской плавильной печи с тиристорным управлением напряжения в первичной обмотке. Скорость нагрева регулируется вторичным напряжением трансформатора или первичным током; соответствующие приборы установлены на панели управления трансформатора.

### ***8.2.2. Расчет нагрева образцов перед испытанием***

Процесс электроконтактного нагрева характеризуется следующими параметрами:

- силой тока  $I$ , необходимой для нагрева до заданной температуры в течение заданного времени  $\tau$ ;
- напряжением на вторичной обмотке трансформатора, обеспечивающим при известном сопротивлении всей внешней цепи требуемый ток;
- мощностью нагрева;
- мощностью тепловых потерь.

Нагреваются одновременно два образца диаметрами  $d_1 = 10...12$  мм и  $d_2 = 10$  мм с длиной рабочей части  $l_0 = 30$  мм, включенные последовательно в цепь вторичной обмотки трансформатора.

Поскольку диаметры и сечения образцов различны, то равные токи имеют различную плотность и, следовательно, нагрев образцов осуществляется с различной скоростью. Плотность тока в образце меньшего диаметра выше, поэтому цепь этого образца шунтируется. В итоге падение напряжения на втором образце совпадает с падением напряжения на параллельной цепи первый образец – шунт. Поэтому расчет силы тока проводится для образца большего диаметра  $d_1$ , принимаемого практически в диапазоне от 10,2 до 12,0 мм.

Площади поперечного сечения образца с диаметром  $d_1$  равны

$$S_{\min} = \frac{\pi d_{1\min}^2}{4} = \frac{\pi \cdot 10,2^2}{4} = 81,7 \text{ мм}^2 = 0,817 \text{ см}^2;$$

$$S_{\max} = \frac{\pi d_{1\max}^2}{4} = \frac{\pi \cdot 12^2}{4} = 113,1 \text{ мм}^2 = 1,131 \text{ см}^2.$$

Объем рабочей части образца:

$$V_{\min} = S_{\min} l_0 = 0,817 \cdot 3 = 2,45 \text{ см}^3;$$

$$V_{\max} = S_{\max} l_0 = 1,131 \cdot 3 = 3,39 \text{ см}^3.$$

Масса образца при плотности  $\gamma = 2,72 \text{ г/см}^3$

$$m_{\min} = V_{\min} \cdot \gamma = 2,45 \cdot 2,7 = 6,61 \text{ г},$$

$$m_{\max} = V_{\max} \cdot \gamma = 3,39 \cdot 2,7 = 9,15 \text{ г}.$$

При нагреве с  $t_1 = 20^\circ\text{C}$  до  $t_2 = 500^\circ\text{C}$  без учета тепловых потерь работа электрического тока составляет

$$A_{\min} = m_{\min} \cdot C_p (t_2 - t_1),$$

где  $C_p$  – средняя удельная теплоемкость материала заготовки в данном температурном интервале, Дж/(кг·К),

$$C_p = \frac{C_{pt_1} + C_{pt_2}}{2},$$

где  $C_{pt_1}$  и  $C_{pt_2}$  – удельные теплоемкости материала заготовки при температурах  $t_1$  и  $t_2$  соответственно.

Для алюминия  $C_{pt_1} = 871 \text{ Дж/(кг·К)}$ ;  $C_{pt_2} = 1118 \text{ Дж/(кг·К)}$ ;  $C_p = 995 \text{ Дж/(кг·К)}$ .

Следовательно, при нагреве образца до  $500^\circ\text{C}$  работа

$$A_{\min} = 6,61 \cdot 10^{-3} \cdot 995 (500 - 20) = 3157 \text{ Дж};$$

$$A_{\max} = 9,15 \cdot 10^{-3} \cdot 995 (500 - 20) = 4370 \text{ Дж}.$$

Мощность электрического тока при нагреве без учета потерь тепла определяется исходя из заданного времени  $\tau$  нагрева образцов перед испытанием:

$$W'_{\min} = A_{\min} / \tau; \quad W'_{\max} = A_{\max} / \tau.$$

В процессе нагрева часть тепла теряется лучеиспусканием – инфракрасным излучением, конвекцией и теплопроводностью в захватах, удерживающих образец в процессе кручения и обеспечивающих надежный электрический контакт.

Мощность потерь тепла конвекцией в спокойной окружающей воздушной среде определяется по формуле [52]:

$$P_k = \frac{3,5 \cdot 10^{-4} \cdot F(t_2 - t_1)^{5/4}}{d^{1/4}},$$

где  $F$  – поверхность цилиндрической рабочей части образца,  $\text{см}^2$ ;  
 $d$  – диаметр рабочей части образца,  $\text{см}$ .

В рассматриваемом случае нагрева двух образцов с диаметрами  $d_1 = 10,2 \dots 12,0$  мм и  $d_2 = 10,0$  мм

$$P_k^{\min} = 3,5 \cdot 10^{-4} (t_2 - t_1)^{5/4} \left( \frac{F_{1\min}}{d_{1\min}^{1/4}} + \frac{F_2}{d_2^{1/4}} \right);$$

$$F_{1\min} = \pi d_{1\min} l_0 = \pi \cdot 1,2 \cdot 3 = 9,61 \text{ см}^2;$$

$$F_2 = \pi d_2 l_0 = \pi \cdot 1 \cdot 3 = 9,42 \text{ см}^2.$$

$$P_k^{\min} = 3,5 \cdot 10^{-4} (480^0)^{5/4} \left( \frac{9,61}{1,02^{1/4}} + \frac{9,42}{1^{1/4}} \right) = 14,9 \text{ Вт} \cong 15 \text{ Вт}.$$

Соответственно

$$F_{1\max} = \pi d_{1\max} l_0 = \pi \cdot 1,2 \cdot 3 = 11,3 \text{ см}^2,$$

$$P_k^{\max} = 3,5 \cdot 10^{-4} (480^0)^{5/4} \left( \frac{11,3}{1,2^{1/4}} + 9,42 \right) = 15,9 \text{ Вт} \cong 16 \text{ Вт}.$$

Мощность потерь излучением ориентировочно определяется по формуле [52]:

$$P_{\text{и}} = 5,7 \varepsilon_0 \left[ \left( \frac{t_2 + 273}{1000} \right)^4 - \left( \frac{t_1 + 273}{1000} \right)^4 \right] \cdot F,$$

где  $\varepsilon_0$  – коэффициент черноты излучения,  $\text{Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{К}^4)$ .

Для описанных при нагреве до  $500^{\circ}\text{C}$  алюминиевых сплавов  $\varepsilon_0 = 0,11 \dots 0,19$  Вт/(см<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>). При расчетах принято  $\varepsilon_0 = 0,19$  Вт/(см<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>):

$$P_{\text{и}}^{\text{min}} = 5,7 \cdot 0,19 \left[ \left( \frac{500 + 273}{1000} \right)^4 - \left( \frac{20 + 273}{1000} \right)^4 \right] \cdot (9,61 + 9,42) = 7,2 \text{ Вт};$$

$$P_{\text{и}}^{\text{max}} = 5,7 \cdot 0,19 \left[ \left( \frac{500 + 273}{1000} \right)^4 - \left( \frac{20 + 273}{1000} \right)^4 \right] \cdot (11,3 + 9,42) = 7,85 \text{ Вт}.$$

Сравнительно малые потери тепла излучением определяются низкой температурой нагрева образцов при пластометрических испытаниях.

При холодных контактах образцов с захватами мощность тепловых потерь теплопроводностью может быть определена по формуле [52]:

$$P_{\text{т}} = \frac{0,275 \cdot 10^{-4} (t_3 - t_{\text{к}}) F_{\text{к}}}{\frac{0,1}{\lambda_3} + \frac{1}{\lambda_{\text{к}}}},$$

где  $t_3$  – температура нагрева образца,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_{\text{к}}$  – температура контактов,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\lambda_3$  – коэффициент теплопроводности материала образцов, Дж/(см·К);

$\lambda_{\text{к}}$  – коэффициент теплопроводности материала контактов, Дж/(см·К);

$F_{\text{к}}$  – суммарная площадь контакта образцов с захватами, см<sup>2</sup>.

Для алюминиевых сплавов  $\lambda_3$  составляет –

при $20^{\circ}\text{C}$	207 Дж/(см·К)	$300^{\circ}\text{C}$	233 Дж/(см·К)
$100^{\circ}\text{C}$	213 Дж/(см·К)	$400^{\circ}\text{C}$	238 Дж/(см·К)
$200^{\circ}\text{C}$	222 Дж/(см·К)	$500^{\circ}\text{C}$	241 Дж/(см·К)

Среднеинтегральное значение  $\lambda_3 = 220$  Дж/(см·К).

В условиях нормального теплового режима медных контактов температура захватов не должна быть выше  $100^{\circ}\text{C}$ . При расчетах принято  $t_{\text{к}} = 50^{\circ}\text{C}$ ;  $F_{\text{к}} = 10$  см<sup>2</sup>;  $\lambda_{\text{к}} = 393$  Дж/(см·К):

$$P_{\text{т}} = \frac{0,273 \cdot 10^{-4} (500 - 50) \cdot 10}{\frac{0,1}{220} + \frac{1}{393}} \cong 41 \text{ Вт}.$$

Таким образом, полная мощность тепловых потерь составляет

$$P_{\Sigma}^{\min} = 14,9 + 7,2 + 41 = 63,1 \text{ Вт} \cong 63 \text{ Вт},$$

$$P_{\Sigma}^{\max} = 15,9 + 7,85 + 41 = 64,75 \text{ Вт} \cong 65 \text{ Вт}.$$

Мощность электрического тока при нагреве рабочей части образца диаметром  $d_1$  с учетом тепловых потерь составит от  $W_{\min} = W'_{\min} + P_{\Sigma}^{\min} - P_{\Sigma 2}$  до  $W_{\max} = W'_{\max} + P_{\Sigma}^{\max} - P_{\Sigma 2}$ , где  $P_{\Sigma 2}$  – суммарная мощность тепловых потерь при нагреве второго образца диаметром  $d_2 = 10$  мм.

Аналогичный расчет дает значение  $P_{\Sigma 2} = 31,5$  Вт.

С учетом малых различий значений суммарных тепловых потерь в дальнейших расчетах принято, что при нагреве алюминиевых образцов диаметров от 10 до 12 мм мощность суммарных тепловых потерь для каждого образца составляет  $P = 32$  Вт.

Таким образом,  $W_{\min} = W'_{\min} + P$ ;  $W_{\max} = W'_{\max} + P$ .

Значения мощностей электрического тока при нагреве в зависимости от длительности нагрева приведены в табл. 52.

Таблица 52

Мощность электрического тока при нагреве алюминиевых образцов диаметром  $d_1 = 10,2 \dots 12,0$  мм

Время нагрева, с	$W_{\min}$ , Вт	$W_{\max}$ , Вт
10	347,7	469,0
20	189,8	250,5
30	137,2	177,6
40	110,9	141,2
50	95,1	119,4
60	84,6	104,8

Осуществлять нагрев с продолжительностью более 60 с нецелесообразно, поскольку мощность тепловых потерь становится соизмеримой с мощностью нагрева рабочих частей образцов.

Сила тока, необходимая для нагрева образцов за заданный промежуток времени  $\tau$ , определяется выражением  $I = \sqrt{W/R}$ , где  $R$  – сопротивление рабочей части образца, определяемое по известной формуле  $R = \rho(l/S)$ .



Среднее удельное сопротивление материала заготовки в интервале температур  $(t_1, t_2)$  задается как среднее арифметическое

$$\rho = \frac{\rho_{t_1} + \rho_{t_2}}{2}.$$

Для технического алюминия и низколегированных сплавов принято:

$$\rho_{20^0\text{C}} = 2,56 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см};$$

$$\rho_{500^0\text{C}} = 8,37 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см};$$

$$\rho = 5,51 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}.$$

Сопротивление образца диаметром  $d_1 = 10,2 \dots 12,0$  мм определено в интервале

$$R_{\max} = \rho \frac{l_0}{S_{\min}} = 5,51 \cdot 10^{-6} \frac{3}{0,817} = 20,2 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} = 20,2 \text{ мкОм},$$

$$R_{\min} = \rho \frac{l_0}{S_{\max}} = 5,51 \cdot 10^{-6} \frac{3}{1,131} = 14,6 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} = 14,6 \text{ мкОм}.$$

Сила тока для обеспечения нагрева образца  $d_1$  с заданной скоростью приведена в табл. 53

Таблица 53

Сила тока, необходимая для нагрева образца диаметром  $d_1 = 10,2 \dots 12,0$  мм с заданной скоростью

Время нагрева, с	$I_{\min}$ , А, при $d_1 = 10,2$ мм	$I_{\max}$ , А, при $d_1 = 12,0$ мм
10	4149	5668
20	3065	4142
30	2606	3488
40	2343	3109
50	2170	2860
60	2046	2680

Плотность тока, достаточная для нагрева рабочей части образца за определенный заданием промежуток времени, практически не зависит при сравнительно малых тепловых потерях от диаметра образца и имеет значения, приведенные в табл. 54.

Плотность тока в сечении рабочей части образца при различной продолжительности нагрева

Время нагрева, с	$q$ , А/мм <sup>2</sup>
10	50,8
20	37,5
30	31,9
40	28,7
50	26,5
60	25,0

Поскольку образцы установлены в последовательной цепи вторичной обмотки трансформатора, то напряжение вторичной цепи определяется суммарной потерей напряжения на всех участках цепи питания и на контактных соединениях элементов этой цепи. При расчете учитывается лишь активная составляющая сопротивлений участков цепи. Реактивные сопротивления при сравнительно небольшой частоте тока пренебрежимо малы. Полное активное сопротивление последовательной цепи электроконтактного нагрева образцов включает:

- сопротивление вторичной обмотки трансформатора  $R_1$ ;
- сопротивление токоподводящих шин  $R_2$ ;
- сопротивление гибких проводов токоподвода  $R_3$ ;
- сопротивление образцов  $R_4$ ;
- сопротивление корпусов активных захватов  $R_5$ ;
- сопротивление контактной пластины  $R_6$ ;
- сопротивление контактов:
  - $R_{к1}$  – выводы вторичной обмотки трансформатора – токоподводящие шины;
  - $R_{к2}$  – токоподводящие шины – гибкие провода токоподвода;
  - $R_{к3}$  – медные захваты – алюминиевые образцы;
  - $R_{к4}$  – активные захваты – контактная пластина.

Вторичная обмотка трансформатора печи Таммана имеет 4 витка диаметром 300 мм, намотанных медной шиной сечением 8х50 мм, и два отвода длиной по 800 мм сечением 10х100 мм. Длина обмотки составляет 377 см; удельное электросопротивление меди марки М1 принято равным

$$\rho = 1,71 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}.$$

Следовательно, полное активное сопротивление вторичной обмотки с внешними отводами

$$R_1 = 1,71 \cdot 10^{-6} \left( \frac{377}{0,5 \cdot 5} + \frac{160}{1 \cdot 10} \right) = 285,2 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \approx 285 \text{ мкОм}.$$

Сопротивление токоподводящих шин длиной по 2 м и сечением 400 мм<sup>2</sup>

$$R_2 = 1,71 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{400}{4} = 171 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} = 171 \text{ мкОм}.$$

Сопротивление гибких медных проводов длиной по 500 мм и сечением 175 мм<sup>2</sup>

$$R_3 = 1,71 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{100}{1,75} = 97,7 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \approx 98 \text{ мкОм}.$$

Сопротивление верхних контактов из-за сравнительной малости не учитывается. Активное сопротивление медных корпусов активных захватов длиной по 140 мм и сечением 314 мм<sup>2</sup> составляет

$$R_5 = 1,71 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{28}{3,14} = 15,2 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \approx 15 \text{ мкОм}.$$

Сопротивление медной контактной пластины длиной 90 мм и сечением 10x80 мм

$$R_6 = 1,71 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{9}{8} = 1,92 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \approx 2 \text{ мкОм}.$$

Сопротивление рабочих частей алюминиевых образцов определяется величиной сопротивления образца большого диаметра

$$R_{\min} \leq R_4 \leq R_{\max}; \quad 14,6 \text{ мкОм} \leq R_4 \leq 20,2 \text{ мкОм}.$$

При расчете вторичного напряжения трансформатора принимается

$$R_4 = R_{\max} = 20,2 \text{ мкОм}.$$

Образец меньшего диаметра с завышенной плотностью тока в последовательной цепи шунтируется, поэтому сопротивление параллельной цепи при расчете также принимается равным  $R_4$ .

Сопротивление контактов медь–медь на соединении отводов обмотки трансформатора с токоподводящими шинами определяется по формуле [53]:  $R_{\kappa 1} = \rho S^{-1/4}$ , где  $S$  – площадь контактов.

Эта формула справедлива при давлении прижима токоподводящих проводов в диапазоне 5...10 кН. Такое давление обеспечивается в конструкции четырьмя болтами М10. Площадь контакта  $S = 30 \text{ см}^2$ .

$$R_{\kappa 1} = 1,71 \cdot 10^{-6} \cdot 30^{-1/4} \cdot 2 = 1,46 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \approx 1,5 \text{ мкОм}.$$

Сопротивление двух контактов соединения токоподводящих шин с гибкими проводами токоподвода (плоское клеммное соединение площадью по  $10 \text{ см}^2$  с прижимом около  $5 \text{ кН}$ ):

$$R_{к2} = 2\rho S^{-1/4} \cdot 2 \cdot 1,71 \cdot 10^{-6} \cdot 10^{-1/4} = 1,92 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \approx 2 \text{ мкОм}.$$

Сопротивление контактов (с учетом возможного окисления) медных захватов с алюминиевыми образцами, по данным [53, табл.1, стр. 43], составляет  $13,2 \text{ мкОм}$ . Для четырех контактов  $R_{к3} = 52,8 \text{ мкОм} \approx 53 \text{ мкОм}$ .

Сопротивление контактов активных захватов с контактной пластиной: четыре контакта медь-графит в совокупности дают сопротивление  $R_{к4} = 64 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} = 64 \text{ мкОм}$  [1].

Полное сопротивление цепи питания при последовательном подключении образцов

$$R = \sum_{i=1}^6 R_i + \sum_{j=1}^4 R_{kj} = 285 + 171 + 98 + 15 + 2 + 40,4 + 1,5 + 2 + 53 + 64 = 731,9 \text{ мкОм} \approx 732 \text{ мкОм} = 0,732 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}.$$

Значения вторичного напряжения трансформатора, необходимые для нагрева образцов с заданной скоростью,  $U = IR$  приведены в табл. 55

Допустима линейная интерполяция функции напряжения  $U$  между  $U_{\min}$  и  $U_{\max}$  при расчете вторичного напряжения трансформатора для  $d_1$  в интервале  $10,2 \dots 12,0 \text{ мм}$ :

$$U = U_{\min} + (d_1 - 10,2) \frac{U_{\max} - U_{\min}}{1,8}, \text{ где } d_1 \text{ в миллиметрах.}$$

Таблица 55

Напряжения на вторичной обмотке трансформатора  
в зависимости от времени нагрева образцов

Время нагрева, с	$U_{\min}$ , В, при $d_1=10,2 \text{ мм}$	$U_{\max}$ , В, при $d_1=12,0 \text{ мм}$
10	3,04	4,15
20	2,24	3,03
30	1,91	2,55
40	1,71	2,27
50	1,59	2,09
60	1,50	1,96

Аппроксимируя зависимости  $U_{\min}$  и  $U_{\max}$  от  $\tau$  выражениями  $U_{\min} = 7,65\tau^{-0,4}$ ,  $U_{\max} = 10\tau^{-0,4}$ , можно получить удобную для практических расчетов формулу:  $U = 1,3\tau^{-0,4}(d_1 - 4,34)$ .

Аналогично представляется интерполяция зависимости силы тока, А, необходимой для нагрева образцов за определенное время, от диаметра  $d_1$ , мм

$$I = I_{\min} + (d_1 - 10,2) \frac{I_{\max} - I_{\min}}{1,8}.$$

Зависимости  $I_{\max}$  и  $I_{\min}$  от времени нагрева и их степени аппроксимации показаны на рис.215.

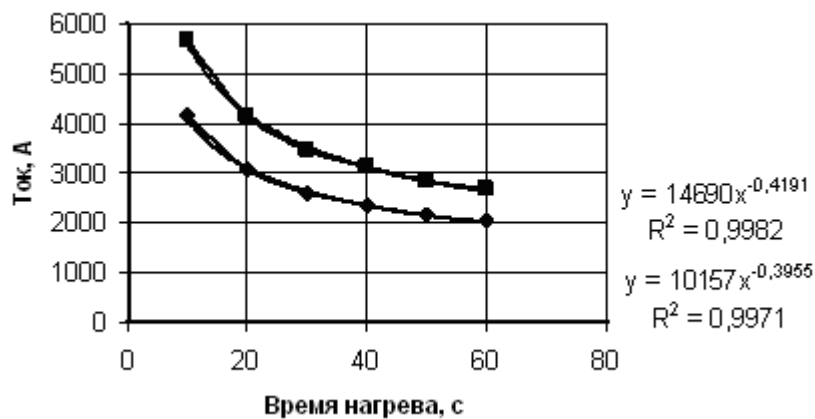


Рис. 215. Сила тока для нагрева:  $\blacklozenge$  –  $I_{\min}$ ,  $\blacksquare$  –  $I_{\max}$

После преобразований можно получить аналогичную зависимость для потребной силы тока:  $I = 1820\tau^{-0,4}(d_1 - 4,5)$ , А.

Потребляемая при проведении пластометрических испытаний электрическая мощность без учета КПД трансформатора представляется выражением  $W = 2,366\tau^{-0,8}(d_1 - 4,36)(d_1 - 4,50)$ , кВт,

где  $\tau$  – время нагрева, с;

$d_1$  – диаметр рабочей части образца в диапазоне от 10,2 до 12,0 мм.

Зависимость потребляемой мощности от времени нагрева до  $500^{\circ}\text{C}$  и от диаметра  $d_1$  при  $d_2 = 10,0$  мм и  $l_0 = 30$  мм приведена на рис. 216.

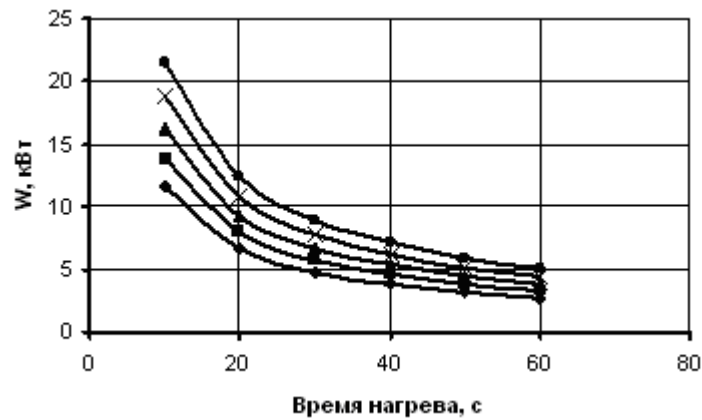


Рис. 216. Потребляемая электрическая мощность: ◆ –  $d_1=10$  мм; ■ –  $d_1=10,5$  мм; ▲ –  $d_1=11$  мм; × –  $d_1=11,5$  мм; ● –  $d_1=12$  мм

### 8.2.3. Расчет параметров шунтирующей цепи

Поскольку последовательно включенные в электрическую цепь образцы имеют различный диаметр рабочей части, плотность тока и скорость нагрева образцов различны. Для выравнивания плотности тока предусматривается параллельный цепи подключения образца меньшего диаметра  $d_2$  шунтирующий контур, включающий в себя ригель 54 (см. рис.211, 213), стойку шунта 53 и перемещаемую при настройке зажимную клемму 56, связанную гибким проводом с верхним захватом 15, в который крепится головка образца меньшего диаметра. Ригель болтами крепится на контактной пластине 24. Ригель и стойка шунта изготовлены из титана ВТ6 и имеют поперечные сечения: ригель  $F_p = 4 \text{ см}^2$ , шунт диаметром  $\varnothing 20 \text{ мм}$   $F_{\text{ш}} = 3,14 \text{ см}^2$ . Активная длина ригеля регулируется переустановкой шунта; с этой целью по длине ригеля выполнены резьбовые отверстия с шагом 50 мм. Активная длина шунта регулируется смещением вдоль его оси медной зажимной клеммы 56. Настройка шунтовой цепи осуществляется при переходе на другой материал образцов при изменении диаметра  $d_1$ . Настройка проводится на стадии преднагрева по показаниям измерителей температуры 50.

Ток в образце большого диаметра  $d_1$

$$I = 1820\tau^{-0,4}(d_1 - 4,5).$$

Плотность тока,  $\text{А/мм}^2$ , в сечении этого образца составляет

$$i = I/F_1, \text{ где } F_1 = \frac{\pi d_1^2}{4}.$$

Такая же плотность тока должна быть обеспечена в образце меньшего диаметра  $d_2$  с площадью сечения  $F_1 = \frac{\pi d_2^2}{4}$ . Следовательно, ток во втором образце должен составлять

$$I_2 = iF_2 = I \frac{F_2}{F_1} = I \frac{d_2^2}{d_1^2}.$$

Параллельные цепи второго образца и шунта включают в себя следующие активные сопротивления.

Цепь образца меньшего диаметра

- $R_2$  – сопротивление рабочей части самого образца;
- $r_1$  – сопротивление активного захвата;
- $r_2$  – сопротивление верхнего захвата;
- $r_3$  – сопротивление контактов головок образца с захватами;
- $r_4$  – сопротивление контакта медь-медь верхнего захвата с клеммой;
- $r_5$  – сопротивление активного захвата второго образца с контактной пластиной;

цепь шунта:

- $r_6$  – сопротивление титанового ригеля с изменяемой базовой длиной  $L_p$  (с шагом 50 мм);
- $r_7$  – сопротивление титанового шунта с непрерывно изменяемой базовой длиной  $L_{ш}$  (от 0 до 300 мм);
- $r_8$  – сопротивление контакта медь-титан ригеля с контактной пластиной;
- $r_9$  – сопротивление контакта титан-титан ригеля с шунтом;
- $r_{10}$  – сопротивление контакта медь-титан с зажимной клеммой;
- $r_{11}$  – сопротивление гибкого медного провода сечением  $1,7 \text{ см}^2$ , соединяющего клеммы шунта и верхнего захвата ( $\varnothing 250 \text{ мм}$ ).

Часть этих сопротивлений уже вычислялась в предыдущем разделе при расчете электрических параметров сети контактного нагрева образцов.

Сопротивление алюминиевого образца диаметром  $d_2 = 10 \text{ мм}$

$$R_2 = \bar{\rho} \frac{l_0}{F_2},$$

где  $\bar{\rho} = \frac{\rho_{20^0\text{C}} + \rho_{500^0\text{C}}}{2}$  – среднее удельное сопротивление материала образца;

$$\rho_{20^0\text{C}} = 2,56 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}; \quad \rho_{500^0\text{C}} = 8,37 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см} [54];$$

$$\bar{\rho} = 5,51 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}.$$

Тогда 
$$R_2 = 5,51 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{3}{0,785} = 21,1 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \approx 21 \text{ мкОм}.$$

Сопротивление активного захвата второго образца длиной 140 мм и диаметром 20 мм 
$$r_1 = 1,71 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{14}{3,14} = 7,62 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \approx 8 \text{ мкОм}.$$

Сопротивление верхнего захвата диаметром 40 мм и длиной 70 мм

$$r_2 = 1,71 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{7}{12,5} = 0,96 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \approx 1 \text{ мкОм}.$$

Сопротивление контактов головок второго образца с захватами типа медь-алюминий с учетом возможного окисления составляет  $r_3 = 26 \text{ мкОм}$  [53].

Сопротивление металла активного захвата с контактной пластиной посредством графитовой уплотненной набивки составляет  $r_5 = 32 \text{ мкОм}$  [52]. Сопротивление контакта медь-медь верхнего захвата с клеммой при площади  $10 \text{ см}^2$  и усилия прижима  $5 \dots 10 \text{ кН}$  определяется по рекомендациям [53]:

$$r_4 = \rho \cdot S^{-\frac{1}{4}} = 1,71 \cdot 10^{-6} \cdot 10^{-\frac{1}{4}} = 0,96 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \approx 1 \text{ мкОм}.$$

Суммарное сопротивление зашунтированной цепи второго образца диаметром  $d_2$  составляет

$$R_{\Sigma_2} = R_2 + \sum_{i=1}^5 r_i = 21 + 8 + 1 + 26 + 1 + 32 = 89 \text{ мкОм} \approx 90 \text{ мкОм}.$$

Сопротивление титанового ригеля  $\rho = 160 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}$  [54], шунт на котором установлен в  $N$ -й позиции при шаге позиции  $\kappa = 2,5 \text{ см}$ , квадратным сечением  $F_p = 4 \text{ см}^2$ :

$$r_6 = \rho_{Ti} \cdot \frac{\kappa N}{F_p} = 160 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{2,5N}{4} = 100 \cdot 10^{-6} N \text{ Ом} = 100 N \text{ мкОм}.$$

Максимальное сопротивление титанового шунта при длине  $L_{\text{ш}}^{\text{max}} = 30 \text{ см}$  и площади поперечного сечения  $F_{\text{ш}} = 3,14 \text{ см}^2$ :

$$r_7 = \rho_{Ti} \cdot \frac{L_{\text{ш}}}{F_{\text{ш}}} = 160 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{30}{3,14} = 1528 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \approx 1530 \text{ мкОм}.$$

Следовательно, смещением зажимной клеммы можно изменять сопротивление шунта  $r_7$  от 0 до 80 мкОм. При настройке цепи  $r_7$  оп-



ределяется позицией установки клеммы  $L_{\text{ш}} \quad r_7 = 51 \cdot L_{\text{ш}} \text{ мкОм}$  при  $L_{\text{ш}} l \text{ см}$ .

Сопротивление контакта медь–титан ригеля с контактной пластиной площадью  $16 \text{ см}^2$  и при усилии прижима до  $10 \text{ кН}$  (3 болта М10) составляет, по данным [53],  $r_8 \approx 15 \text{ мкОм}$ .

Сопротивление контакта титан-титан ригеля с шунтом при затяжке до  $20 \text{ кН}$  составляет  $r_9 = 30 \text{ мкОм}$  [54].

Сопротивление контакта медь-титан шунта с зажимной клеммой при площади  $10 \text{ см}^2$  и усилии зажима около  $5 \text{ кН}$ , а также при отсутствии окислов и грязи на поверхности контакта составляет  $r_{10} = 15 \text{ мкОм}$  [52, рис.48, 114].

Сопротивление гибкого медного провода сечением  $1,7 \text{ см}^2$  и длиной  $30 \text{ см}$

$$r_{11} = 1,71 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{30}{1,7} = 30,2 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \approx 30 \text{ мкОм}.$$

Полное сопротивление шунтирующей цепи, мкОм,

$$R_{\Sigma\text{ш}} = \sum_{j=6}^{11} r_j = 100N + 51L_{\text{ш}} + 15 + 30 + 15 + 30 = 90 + 100N + 51L_{\text{ш}}$$

при  $L_{\text{ш}} l \text{ см}$  и  $N = 1, \dots, 6$ .

Таким образом, регулирование сопротивления шунтирующей цепи возможно в диапазоне от  $R_{\Sigma\text{ш}}^{\min} = 190 \text{ мкОм}$  (при  $N = 1$  и  $L_{\text{ш}} = 0$ ) до  $R_{\Sigma\text{ш}}^{\max} = 2220 \text{ мкОм}$  (при  $N = 6$  и  $L_{\text{ш}} = 30 \text{ см}$ ).

Падение напряжения в зашунтированной цепи второго образца

$$U_2 = I_2 \cdot R_{\Sigma 2} = 1820\tau^{-0,4} \cdot (d_1 - 4,5) \cdot \frac{d_2^2}{d_1^2} \cdot R_{\Sigma 2}.$$

Ток шунта по первому закону Кирхгофа  $I_{\text{ш}} = I - I_2 = I \left( 1 - \frac{d_2^2}{d_1^2} \right)$ .

Активное сопротивление шунта  $R_{\text{ш}} = U_2 / I_{\text{ш}} = \frac{\eta R_{\Sigma 2}}{1 - \eta}$ , где  $\eta = \frac{d_2^2}{d_1^2}$ .

При минимальном диаметре первого образца  $d_1 = 10,2 \text{ мм}$   $\eta = 0,961$ ;  $R_{\text{ш}} = 2220 \text{ мкОм}$ . Это соответствует установке шунта в последнюю позицию на ригеле ( $N = 6$ ) и верхнему положению на шунте зажимной клеммы ( $L_{\text{ш}} = 300 \text{ мм}$ ). При максимальном расчетном диаметре образца  $d_1 = 12,0 \text{ мм}$   $\eta = 0,694$ ;  $R_{\text{ш}} = 204 \text{ мкОм}$ . Эта ситуация реализуется при  $N = 1$  и при установке клеммы в позицию  $L_{\text{ш}} = 2,7 \text{ мм}$ .

Зависимость силы тока в шунтирующей цепи от времени нагрева образцов и диаметра  $d_1$  (при  $d_2 = 10$  мм) приведена на рис. 217.

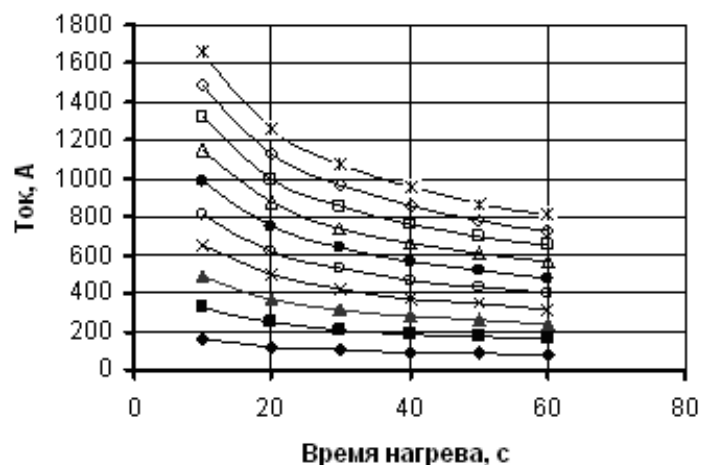


Рис. 217. Сила тока в шунтирующей цепи:  $\blacklozenge$  —  $d_1=10,2$  мм;  $\blacksquare$  —  $d_1=10,4$  мм;  $\blacktriangle$  —  $d_1=10,6$  мм;  $\times$  —  $d_1=10,8$  мм;  $\circ$  —  $d_1=11,0$  мм;  $\bullet$  —  $d_1=11,2$  мм;  $\Delta$  —  $d_1=11,4$  мм;  $\square$  —  $d_1=11,6$  мм;  $\diamond$  —  $d_1=11,8$  мм;  $*$  —  $d_1=12,0$  мм

Сопротивление шунтирующей цепи в зависимости от диаметра  $d_1$  при фиксированном значении  $d_2=10$  мм графически представлено на рис. 218.

Поскольку в шунтирующей цепи предусмотрено два элемента настройки требуемого сопротивления ( $N$  — номер позиции установки шунта на ригеле и высотное положение клеммы на шунте), табл. 56 представляет технически допустимые параметры настройки шунтирующей цепи.

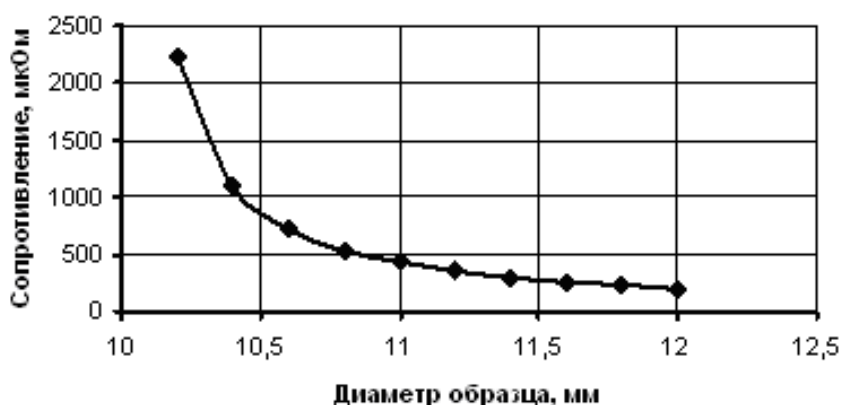


Рис. 218. Сопротивление шунтирующей цепи

## Технически реализуемая длина шунта

$d_1$ мм	Высотное положение контактной клеммы шунта, мм					
	$N=1$	$N=2$	$N=3$	$N=4$	$N=5$	$N=6$
10,2	-	-	-	-	-	301,4
10,4	178,9	159,3	139,7	120,1	100,5	80,9
10,6	105,5	85,8	66,3	46,7	27,0	7,5
10,8	68,7	49,2	29,5	10,0	-	-
11,0	46,7	27,2	7,5	-	-	-
11,2	32,1	12,5	-	-	-	-
11,4	21,6	2,0	-	-	-	-
11,6	13,8	-	-	-	-	-
11,8	7,7	-	-	-	-	-
12,0	2,85	-	-	-	-	-

На рис. 219 эти же параметры показаны графически. Незакрашенная область графика соответствует техническим возможностям шунтирующей цепи при настройке на заданное сопротивление.

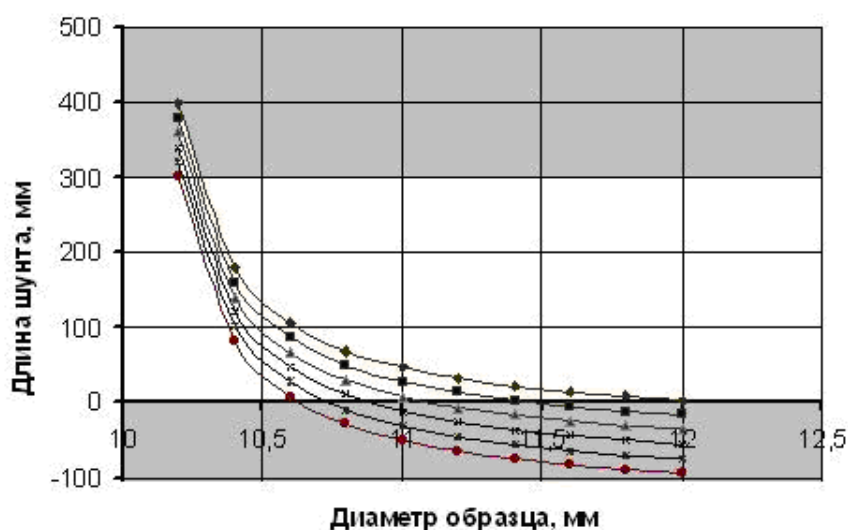


Рис. 219. Настраиваемые размеры шунтирующей цепи:  $\blacklozenge$  —  $N = 1$  мм;  $\blacksquare$  —  $N = 2$  мм;  $\blacktriangle$  —  $N = 3$  мм;  $\times$  —  $N = 4$  мм;  $\star$  —  $N = 5$  мм;  $\bullet$  —  $N = 6$  мм;

Кроме предельно допустимых значений диаметра  $d_1$  — 10,2 и 12,0 мм остальные размеры образца допускают несколько вариантов настройки шунтирующей цепи на заданное сопротивление. Например, при испытании образцов с диаметрами  $d_1 = 10,8$  мм,  $d_2 = 10,0$  мм требуется сопротивление шунтирующей цепи  $R_{ш} = 540,9$  мкОм, что достигается установкой клеммы в высотное положение 68,7 мм (при  $N = 1$ ), 49,2 мм (при  $N = 2$ ), 29,5 мм (при  $N = 3$ ) и 10,0 мм (при  $N = 4$ ).

Номера позиций установки шунта на ригеле  $N$  соответствуют номерам резьбовых отверстий, выполненных в ригеле. Номер возрастает по мере удаления отверстия от места закрепления ригеля на контактной пластине.

#### 8.2.4. Расчет измерительных устройств пластометра

Система замера разности крутящих моментов при испытании на кручение двух образцов различных диаметров  $d_1$  и  $d_2$  ( $d_1 > d_2$ ) является тензометрической и представляет собой зашеченную одним концом балку, подвергаемую упругому изгибу силой, пропорциональной разности моментов упругопластического кручения испытываемых образцов. Схема измерения разности моментов показана на рис. 220.

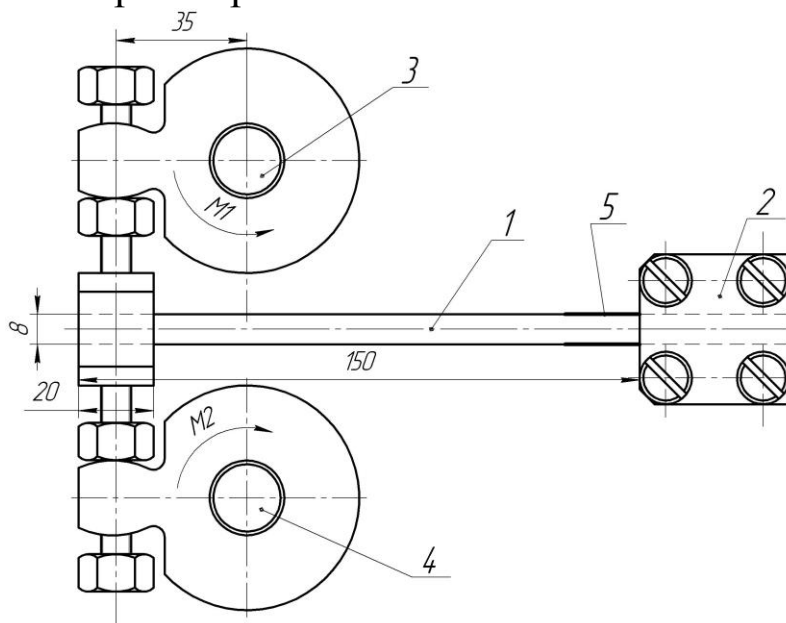


Рис. 220. Схема установки балочной мессдозы для замера разности крутящих моментов: 1 – балочная мессдоза; 2 – неподвижный кронштейн;

3 – рычаг верхнего захвата образца большего диаметра  $d_1$ ;

4 – рычаг верхнего захвата образца меньшего диаметра  $d_2$ ;

5 – тензометрические датчики

Расчетная схема мессдозы представлена на рис. 221. Напряжение изгиба  $q$  создается за счет разности моментов. Толщина и ширина мессдозы  $s_1 = 8$  мм,  $s_2 = 20$  мм. Длина свободного конца  $a = 150$  мм. Приложение усилия на расстояние  $b = 10$  мм. Длина рабочей части датчика сопротивления мессдозы  $B = 19,5$  мм.

Определяется максимально и минимально возможное напряжение  $q$ , возникающее при кручении образцов.

Касательное напряжение, оценивающее величину сопротивления сдвиговой деформации, определяется по формуле

$$\tau_s = \frac{12(M_1 - M_2)}{\pi(d_1^3 - d_2^3)},$$

где  $d_1 > d_2$  – диаметры образцов;

$M_1$  и  $M_2$  – крутящие моменты.

Отсюда разность моментов  $M_1 - M_2 = \frac{\tau_s \pi (d_1^3 - d_2^3)}{12}$ .

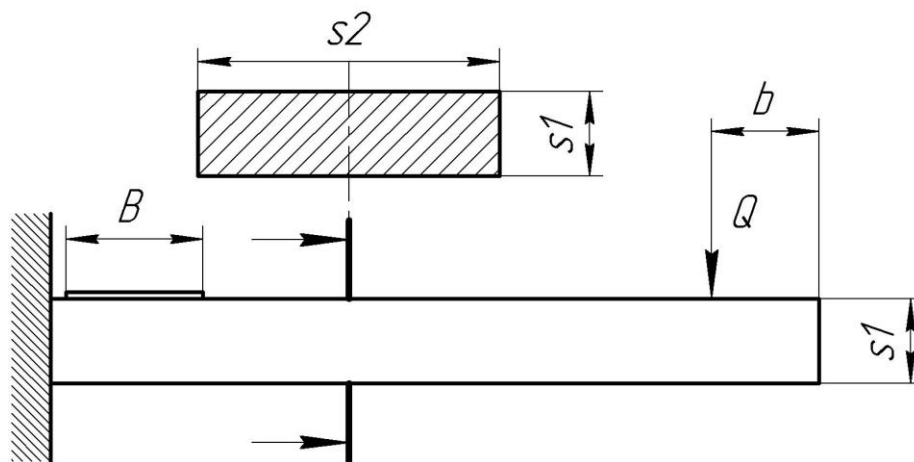


Рис. 221. Расчетная схема мессдозы

Нетрудно посчитать максимальную и минимальную разность моментов. Предполагается, что диаметр каждого образца находится в пределах от 10 до 12 мм. Максимальная разность моментов возникнет при холодной деформации и наибольшей степени деформации при кручении образцов 10 мм и 12 мм. Минимальная разность моментов возникнет при горячей деформации и минимальном различии в диаметрах образцов.

В качестве примера расчет проведен для случая пластометрических испытаний алюминиевого сплава Д16, кривые упрочнения по данным [24] представлены на рис. 222.

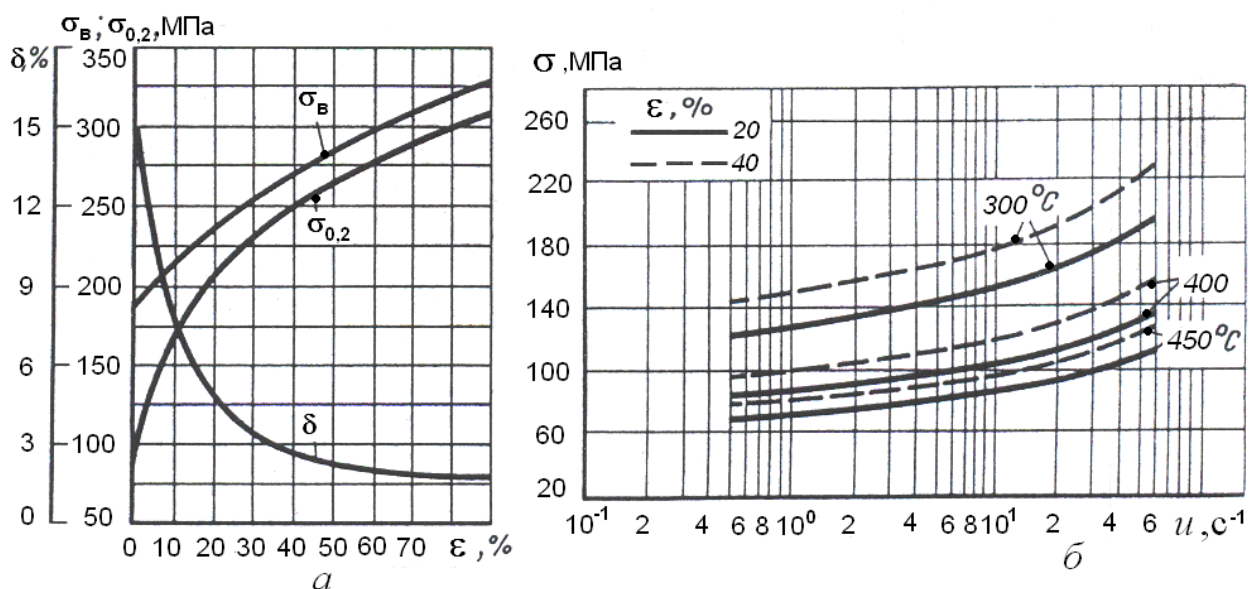


Рис. 222. Кривые упрочнения сплава Д16: а – при холодной деформации; б – при горячей деформации

При расчете параметров мессдозы принято, что испытание проводится на образцах с диаметрами  $d_1 = 12,0$  мм,  $d_2 = 10,0$  мм с углом скручивания на базовой длине  $l_0 = 30$  мм.

Сдвиговая деформация определяется по углу закручивания  $\varphi$

$$\gamma = \frac{\pi \bar{d}}{l_0} \cdot \frac{\varphi}{360^\circ}, \text{ где } \bar{d} = \frac{d_1 + d_2}{2} = 11 \text{ мм.}$$

При  $\varphi = 360^\circ$   $\gamma = 1,152$ . Степень деформации  $\varepsilon = \frac{\gamma}{\sqrt{3}} = \frac{1,152}{\sqrt{3}} = 0,665$ .

Это степени холодной деформации соответствует по кривой упрочнения (рис. 222, а)  $\sigma_s = 270$  МПа. Сопротивление деформации сдвига по гипотезе Мизеса

$$\tau_s = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} = \frac{270}{\sqrt{3}} = 155,9 \text{ МПа.}$$

Разность крутящих моментов при таком испытании составляет

$$M_1 - M_2 = \frac{155,9 \cdot 10^6 \cdot \pi (12^3 - 10^3) \cdot 10^{-9}}{12} = 29,7 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Увеличение угла скручивания при холодной деформации не приводит к значительному росту  $\tau_s$  и, следовательно, разности моментов. Кроме того, при столь значительных сдвиговых холодных деформациях велика вероятность разрушения образца. Поэтому полученное значение можно считать максимальной разностью крутящих моментов. Поскольку при холодной деформации скорость кручения не влияла

на величину сопротивления деформации, то выбор скорости скручивания произволен и определяется удобством проведения испытаний.

При горячей деформации  $\sigma_s$  и  $\tau_s$  зависят не только от  $\varepsilon$ , но и от температуры и скорости деформации. При расчете принято, что испытания проводятся при температуре 450<sup>0</sup>С.

Скорость деформации  $\xi = d\varepsilon/d\tau$  в данной пластометрической установке задается частотой вращения шпинделя токарного станка. Кроме того, в конструкции пластометра предусмотрена возможность установки как двух-, так и четырехзаходных червяков без изменения остальных конструктивных элементов. Скорость деформации можно оценить отношением  $\xi = \varepsilon/\tau$ , где  $\tau$  – время скручивания с постоянной скоростью.

Угловая скорость вращения активных захватов, рад/с,

$$w = \frac{6n}{i}, \text{ град/с}; \quad w = \frac{\pi n}{30i},$$

где  $n$  – частота вращения шпинделя токарного станка и, следовательно, червяка, об/мин;

$i$  – передаточное число червячной передачи;  $i = z_2/z_1$ ;

$z_2$  – число зубьев червячного колеса;

$z_1$  – число заходов (ниток) червяка.

В данной конструкции при установке двухзаходного червяка  $i=13$ , четырехзаходного –  $i=6,5$ . Величина  $n$  меняется дискретно посредством переключения коробки передач. В табл. 57 приведены значения  $w$ , град/с;  $\tau$ , с;  $\xi$ , с<sup>-1</sup>, для всего набора частот вращения шпинделя станка для случаев установки двух- и четырехзаходного червяков при осуществлении закручивания образцов на угол  $\varphi = 360^0$ .

Легированные алюминиевые сплавы из-за малой скорости динамического разупрочнения деформируются в горячем состоянии со сравнительно малой скоростью. Как показывает практика, наиболее приемлемым диапазоном скоростей деформации  $\xi$  является 0,01...0,1 с<sup>-1</sup>. Для примера рассмотрена скорость деформации  $\xi=0,05$  с<sup>-1</sup>, которая реализуется либо при частоте вращения шпинделя 556 об/мин (при двухзаходном червяке), либо 28 об/мин (при четырехзаходном червяке). Сопротивление деформации в этом случае равно  $\sigma_s = 60$  МПа и  $\tau_s = 34,6$  МПа. В случае максимального различия диаметров образцов ( $d_1 = 12,0$  мм,  $d_2 = 10,0$  мм)

$$M1 - M2 = \frac{34,6 \cdot 10^6 \pi (12^3 - 10^3) \cdot 10^{-9}}{12} = 0,55 \text{ Нм.}$$

Таблица 57

Реализуемые на пластометре скорости деформации

$n$ , об/мин	Двухзаходный червяк, $i=13$			Четырехзаходный червяк, $i=6,5$		
	$\omega$ , град/с	$\tau$ , с	$\xi$ , с <sup>-1</sup>	$\omega$ , град/с	$\tau$ , с	$\xi$ , с <sup>-1</sup>
9	4,15	86,7	0,008	8,31	43,3	0,015
11,2	5,17	69,6	0,010	10,34	34,8	0,019
18	8,31	43,3	0,015	16,62	21,7	0,031
28	12,9	27,9	0,024	25,8	13,9	0,048
45	20,8	17,3	0,038	41,5	8,67	0,077
56	25,8	13,9	0,048	51,7	6,96	0,095
71	32,8	11,0	0,061	65,5	5,49	0,121
90	41,5	8,67	0,077	83,1	4,33	0,153
112	51,7	6,96	0,095	103,4	3,48	0,191
140	64,6	5,57	0,119	129,2	2,79	0,239
180	83,1	4,33	0,153	166,1	2,17	0,307
224	103,4	3,48	0,191	206,8	1,74	0,382
355	163,8	2,20	0,303	327,7	1,10	0,605
450	207,7	1,73	0,384	415,4	0,87	0,767
560	258,5	1,39	0,477	516,9	0,70	0,955
710	327,7	1,10	0,605	655,4	0,55	1,211
900	415,4	0,87	0,767	830,8	0,43	1,535
1120	516,9	0,70	0,955	1033,8	0,35	1,910
1400	646,1	0,56	1,194	1292,3	0,28	2,387
1800	830,8	0,43	1,535	1661,5	0,22	3,069

Примечание. Повышение скорости деформации при испытаниях на описываемом пластометре возможно за счет уменьшения базовой длины образцов  $l_0$ .

Разницу крутящих моментов  $M1 - M2 = 0,55 \text{ Нм}$  можно рассматривать как минимальное значение, реализуемое при проведении пластометрических исследований алюминиевых сплавов.

Поворотные рычаги 18 верхних захватов уравнивают крутящие моменты  $M1$  и  $M2$  силами, приложенными к выступам рычагов на радиусе  $R_p = 0,035 \text{ м}$ . Поскольку эти силы имеют встречное направление, на балку мессдозы действует результирующая сила

$$Q = \frac{M1 - M2}{R_p},$$



которая принимает значения от  $Q_{\max}$  до  $Q_{\min}$ . В рассматриваемом примере расчета для испытания образцов из сплава Д16

$$Q_{\max} = \frac{29,8}{0,035} = 848,6 \text{ Н}; \quad Q_{\min} = \frac{0,55}{0,035} = 15,7 \text{ Н}.$$

Соответственно при проведении пластометрических испытаний образцов ( $d_1 = 12,0$  мм,  $d_2 = 10,0$  мм) сплава Д16 в горячем состоянии ( $450^\circ\text{C}$ ) при скорости деформации  $\xi = 0,05 \text{ с}^{-1}$   $Q = \frac{6,59}{0,035} = 188,3 \text{ Н}$ .

Сила  $Q$  приложена к консольной балке мессдозы на расстоянии  $b = 10$  мм от свободного конца, а центр рабочей части тензодатчика с базой  $B = 20$  мм расположен на расстоянии 10 мм от заделки балки. Таким образом, при общей длине консоли мессдозы 150 мм плечо приложения силы  $Q$ , создающей изгибающий момент  $M_{\text{изг}}$  в сечении наклейки датчиков, составляет  $R_m = 130 \text{ мм} = 0,13 \text{ м}$ .

$M_{\text{изг}} = Q \cdot R_m$  и при испытаниях принимает значения в интервале от  $M_{\text{изг}}^{\max} = 848,6 \cdot 0,13 = 110,3 \text{ Н} \cdot \text{м}$  до  $M_{\text{изг}}^{\min} = 15,7 \cdot 0,13 = 2,04 \text{ Н} \cdot \text{м}$ . Высота сечения балки  $S1 = 8,5$  мм, ширина  $S2 = 20$  мм (см. рис. 221), что определяет момент сопротивления изгибу сечения

$$W_{\text{изг}} = \frac{S2 \cdot S1^2}{6} = \frac{0,02 \cdot 0,0085^2}{6} = 2,83 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3.$$

Следовательно, максимальное напряжение в сечении наклейки датчиков может принимать значения в интервале

$$\sigma_{\text{изг}}^{\max} = \frac{M_{\text{изг}}^{\max}}{W_{\text{изг}}} = \frac{110,3}{28,3} \cdot 10^8 = 4,58 \cdot 10^8 \text{ Па} = 458 \text{ МПа},$$

$$\sigma_{\text{изг}}^{\min} = \frac{M_{\text{изг}}^{\min}}{W_{\text{изг}}} = \frac{2,04}{28,3} \cdot 10^8 = 0,078 \cdot 10^8 \text{ Па} = 7,8 \text{ МПа}.$$

Относительная деформация металла балки в зоне наклейки датчика составляет

$$\varepsilon_{\text{изг}}^{\max} = \frac{\sigma_{\text{изг}}^{\max}}{E} = \frac{4,58 \cdot 10^8}{210 \cdot 10^9} = 2,18 \cdot 10^{-3},$$

$$\varepsilon_{\text{изг}}^{\min} = \frac{\sigma_{\text{изг}}^{\min}}{E} = \frac{0,078 \cdot 10^8}{210 \cdot 10^9} = 0,037 \cdot 10^{-3}.$$

Эти относительные деформации могут рассматриваться в качестве коэффициентов удлинения рабочих тензометрических датчиков.

Датчики с номинальным сопротивлением  $R_0 = 200$  Ом наклеиваются на поверхности, перпендикулярные плоскости изгиба балки, таким образом, что два датчика испытывают растяжение, а два других датчика – сжатие. Соответственно при изгибе балки их сопротивления становятся  $R_0 + \Delta R$  (растяжение) и  $R_0 - \Delta R$  (сжатие). Все датчики собираются в мостовую схему, как это показано на рис. 223.

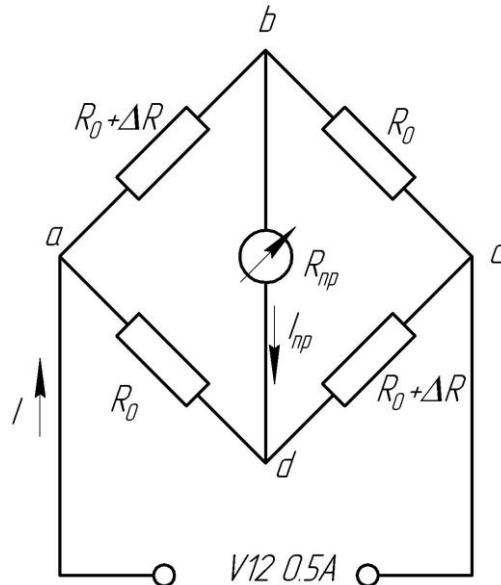


Рис. 223. Электрическая схема балочной мессдозы измерения разности моментов кручения испытываемых образцов

Питание от блока стабилизированного питания подводится к точкам  $a$  и  $c$ , а аналоговые входы устройства сопряжения ЭВМ с объектами (УСО) подключаются к измерительной диагонали моста  $b-d$ . При проведении испытаний на рассматриваемых в примере образцах ток  $I_{пр}$  в измерительной диагонали может меняться

$$\text{от } I_{пр}^{\max} = I \frac{\varepsilon_{изг}^{\max} R_0}{(R_{пр} + R_0)} \text{ до } I_{пр}^{\min} = I \frac{\varepsilon_{изг}^{\min} R_0}{(R_{пр} + R_0)}, \quad [55],$$

где  $I = 0,5$  А – ток питания, определяемый напряжением питания и полным сопротивлением мостовой схемы;

$R_{пр}$  – внутреннее сопротивление цепи аналогового входа УСО;

$R_{пр} = 10$  кОм.

$$I_{пр}^{\max} = \frac{0,5 \cdot 2,18 \cdot 10^{-3} \cdot 200}{10000 + 200} = 21,4 \cdot 10^{-6} \text{ А} = 21,4 \text{ мА};$$

$$I_{пр}^{\min} = \frac{0,5 \cdot 0,037 \cdot 10^{-3} \cdot 200}{10000 + 200} = 0,36 \cdot 10^{-6} \text{ А} = 0,36 \text{ мА}.$$

Соответственно падение напряжения на измерительной диагонали моста меняется от 214 до 3,6 мВ.

Отклонение свободного конца балочной мессдозы под действием нагрузки  $Q$  определяется выражением [56]:  $\Delta S = \frac{4QR_M^3}{E \cdot S_2 \cdot S_1^3}$ , где

$E = 210$  МПа – модуль нормальной упругости материала балки (Сталь 50). В расчетном диапазоне изменения  $Q$   $\Delta S$  меняется от

$$\Delta S^{\max} = \frac{4 \cdot 848,6 \cdot 0,13^3 \cdot 10^3}{210 \cdot 10^9 \cdot 0,02 \cdot 0,0085^3} = 2,88 \text{ мм до}$$

$$\Delta S^{\min} = \frac{4 \cdot 15,7 \cdot 0,13^3 \cdot 10^3}{210 \cdot 10^9 \cdot 0,02 \cdot 0,0085^3} = 0,05 \text{ мм. } \Delta S^{\min} \text{ пренебрежимо мало и}$$

не рассматривается при определении угла поворота верхних захватов, удерживающих головки образцов.

При расчете  $\Delta S$  изгиб от перемещающих сил  $Q$  не учитывается, поскольку составляет не более одного процента от изгиба за счет действия изгибающего момента [56].

Максимальный угол поворота рычагов при изгибе мессдозы в сторону захвата с образцом меньшего диаметра составляет достаточно малую величину

$$\alpha = \arcsin \frac{\Delta S^{\max}}{R_p} = \arcsin \frac{2,88}{35} = 4,7^\circ.$$

Косвенное измерение температуры нагрева образцов осуществляется с помощью балочной мессдозы, жестко закрепленной одним концом посредством болта 48 на верхнем торце стяжной шайбы 47. Свободный конец упругой балки с наклеенными на её поверхность тензодатчиками введен в паз рычага 18 верхнего захвата. При тепловом удлинении образца и при осевой неподвижности активного захвата верхний захват смещается вверх в росточках поперечины 16 вместе с рычагом 18, изгибая при этом балку мессдозы. Схема замера температуры образцов показана на рис. 224.

Полагая, что нагревается только рабочая часть образца в 30 мм, можно посчитать величину удлинения образца:

$$\Delta l = l_0 \cdot \Delta t \cdot \alpha,$$

где  $\alpha$  – коэффициент температурного расширения материала. Для сплавов алюминия  $\alpha = 2,4 \cdot 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$ ,  $\Delta t$  – разность температуры заготовки до нагрева и после.

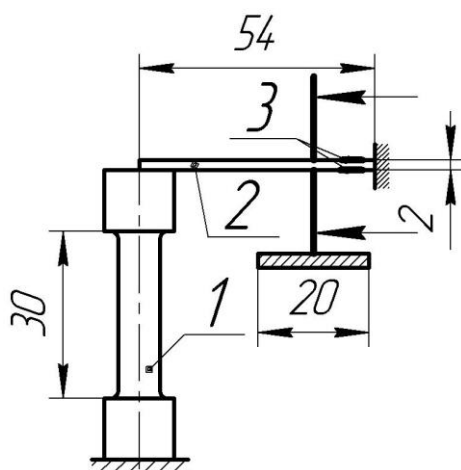


Рис. 224. Схема измерения температуры:  
1 – образец; 2 – балочная мессдоза; 3 – тензодатчики

$$\Delta l = 30 \cdot (500 - 20) \cdot 2,4 \cdot 10^{-5} = 0,34 \text{ мм}$$

Расчет балки выполнен методом конечных элементов. Эквивалентные напряжения и деформация показаны на рис. 225 и рис. 226 соответственно.

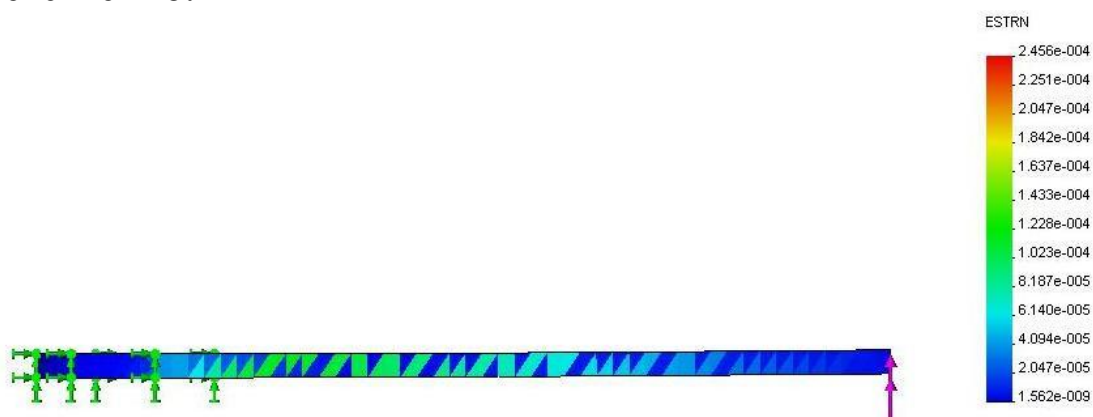


Рис. 225. Эквивалентные напряжения

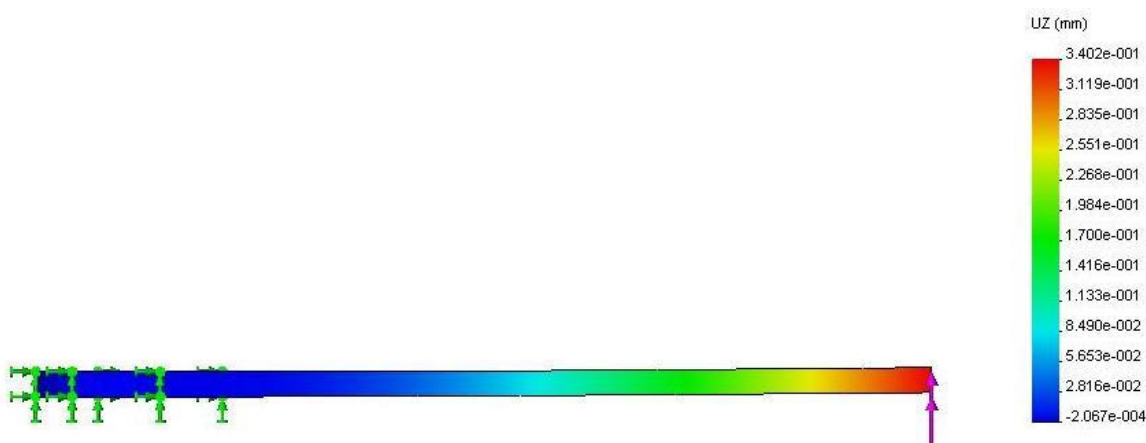


Рис. 226. Деформация

Таким образом, определили, что рабочий датчик сопротивления удлинится на 0,26 %.

Ток в измерителе (ток прибора) определяется по формуле  $I_{\text{пр}} = I \cdot \frac{j \cdot R_0}{(R_{\text{пр}} + R_0)}$ , где  $j$  – коэффициент удлинения рабочего датчика;

$$I_{\text{пр}}^{\text{max}} = 0,5 \cdot \frac{0,0026 \cdot 200}{(10000 + 200)} = 0,217 \text{ мА}.$$

Падение напряжения на измерительной диагонали мостовой схемы включения датчиков при нагреве образцов до 500<sup>0</sup>С составляет 2,17 мВ.

### **8.2.5. Система автоматического сбора и обработки информации ротационного пластометра**

Система содержит датчики или устройства, предназначенные для измерений и предварительной обработки информации, преобразователи непрерывной (аналоговой) информации в цифровую, программно-технические средства, управляющие функционированием системы, устройства внешние запоминающие и предназначенные для отображения информации (дисплеи, принтеры), а также аппараты или программное обеспечение, обеспечивающие диалог между системой и экспериментатором.

Схема построения и функционирования таких систем показана на рис. 227.

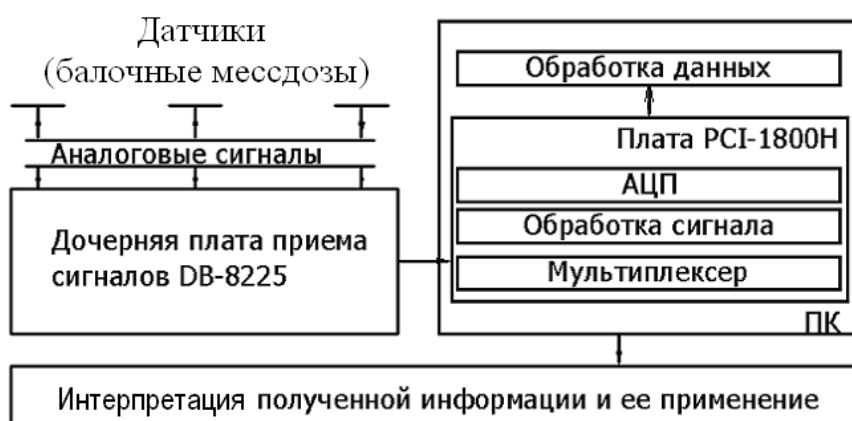


Рис.227. Блок-схема сбора и обработки информации

От всех датчиков в процессе работы пластометра по экранированным проводам поступают аналоговые сигналы на дочернюю (вспомогательную) плату DB-8225. Далее сигнал поступает в персональный компьютер на основную карту сбора данных PCI-1800H, где

происходит первичная обработка сигнала и аналого-цифровое преобразование. Далее данные, представленные в цифровой форме в виде массивов, обрабатываются. После обработки данных на выходе получаем информацию, которая позволяет определить изменение температуры образцов и разности моментов кручения в процессе проведения испытаний.

Мессдозы спроектированы согласно следующим требованиям:

- являются достаточно прочными и имеют минимальное число деталей и соединений;
- электрические части мессдоз (тензодатчики, соединяющие их проводники и выводные провода) надежно защищены от воздействия влаги и масла;
- мессдозы вполне чувствительны к измеряемой нагрузке и имеют линейную тарировку.

Тензодатчики соединяются в балансировочный мост по безусилительной схеме.

Перед установкой на пластометр мессдозы предварительно тарируются на испытательной машине УИМ-10 при помощи специально разработанной программы.

Система автоматического сбора данных с аналоговых датчиков построена на высокоэффективной, мультифункциональной карте PCI-1800(H/L) для персонального компьютера. Данная карта содержит 12-битовый аналого-цифровой преобразователь с частотой 330 кГц. Карта может работать в режиме шестнадцати каналов несимметричных или восьми каналов дифференциальных входов, устанавливаемых с помощью перемычек.

Карта имеет три 16-битных таймера. Таймер №1 используется как главный внешний аналого-цифровой триггер. Таймер №2 используется как внешний триггер времени. Таймер №3 – как независимый внешний таймер для обеспечения выполнения машинного времени.

#### *Характеристика карты PCI-1800(H/L)*

Потребляемая мощность

- 1) +5В , 960 мА максимум;
- 2) рабочая температура 0...700<sup>0</sup>С.

Аналоговые входы:

- 1) 16 каналов несимметричных и 8 каналов дифференциальных входов, устанавливаемых с помощью перемычек;
- 2) коэффициент усиления (программно-управляемый):

для режима Н: 0.5, 1, 5, 10, 50, 100, 500, 1000;

для режима L: 0.5, 1, 2, 4, 8.

3) диапазоны входящего двухполюсного сигнала:

для режима Н:  $\pm 5$  В,  $\pm 0.5$  В,  $\pm 0.05$  В,  $\pm 0.005$  В,  $\pm 10$  В,  $\pm 1$  В,  $\pm 0.1$  В,  $\pm 0.01$  В;

для режима L:  $\pm 5$  В,  $\pm 2.5$  В,  $\pm 1.25$  В,  $\pm 0.625$  В,  $\pm 10$  В;

4) диапазоны входящего однополюсного сигнала:

для режима Н: 0 В~10 В, 0 В~1 В, 0 В~0.1 В, 0 В~0.01 В;

для режима L: 0 В~10 В, 0 В~5 В, 0 В~2.5 В, 0 В~1.25 В;

5) Входной ток: 250 мА при 250<sup>0</sup>С.

Аналого-цифровой преобразователь:

1) разрешение: 16 бит;

2) скорость преобразования (частота): 330 кб;

3) производительность: производительность аналого-цифрового преобразования в зависимости от коэффициента усиления показана в табл.58.

Таблица 58

Производительность аналого-цифрового преобразования

Режим L			
Коэффициент усиления	Двухполюсный сигнал, В	Однополюсный сигнал, В	Производительность, Гц
0.5	$\pm 10$	0~10	333
1	$\pm 5$	0~10	333
2	$\pm 2.5$	0~5	333
4	$\pm 1.25$	0~2.5	333
8	$\pm 0.625$	0~1.25	333
Режим Н			
0.5, 1	$\pm 10$ , $\pm 5$	0~10	40
5, 10	$\pm 1$ , $\pm 0.5$	0~1	40
50, 100	$\pm 0.05$ , $\pm 0.1$	0~0.1	10
500, 1000	$\pm 0.01$ , $\pm 0.005$	0~0.01	1

Внешний вид платы показан на рис. 228.

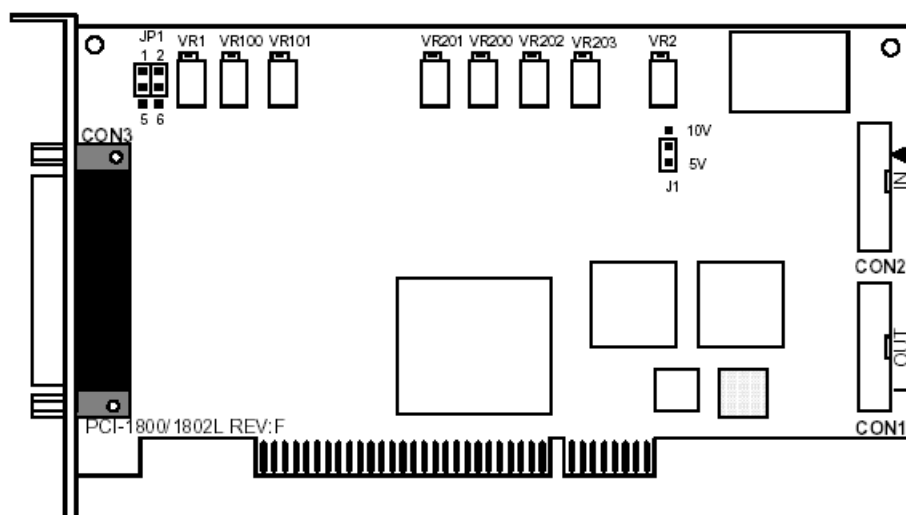


Рис. 228. Внешний вид платы PCI-1800(H/L)

### *Настройка карты*

Секция переключек, обозначенных на плате (см. рис. 228) как JP1, позволяет выбрать режимы работы с входящими аналоговыми сигналами: 16 каналов несимметричных или 8 каналов дифференциальных входов. Для выбора 16 каналов несимметричных входов должны быть замкнуты точки 1-4 и 2-4. Для выбора 8 каналов дифференциальных входов должны быть замкнуты точки 3-5 и 4-6. Схема переключений показана на рис. 229.

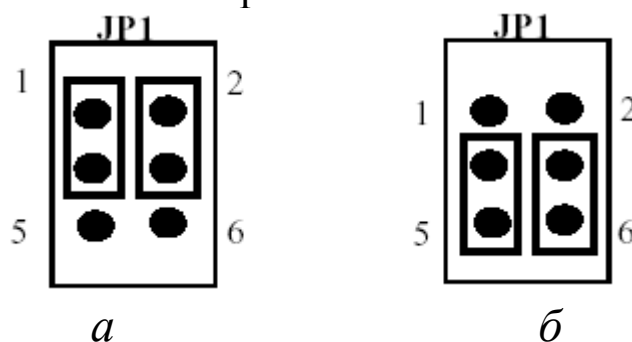


Рис. 229. Схема переключений режимов работы:

*a* – для несимметричных входов; *б* – для дифференциальных входов

### *Дочерняя плата*

В построенной системе содержится дочерняя плата DB-8225. Дочерняя плата служит для снятия аналоговых сигналов с внешних источников и передачи их в основную плату. Дочерняя плата соединяется с основной платой при помощи 37-контактного кабеля через разъем CON3. Плата имеет линейку контактов для входящих сигналов и работает так же, как и основная плата, в двух режимах: диффе-



ренциальных и несимметричных входов (схема выбора режима схожа со схемой выбора на основной плате).

### *Программная составляющая*

#### Программная настройка системы регистрации сигналов

Для настройки карты необходимо задать код, который определяет текущую конфигурацию карты. Код является 16-битным. Сигналы, поступающие от источника, попадают на MUX (мультиплексор), где они уплотняются. За настройку работы MUX отвечают 0, 1, 2, 3, 4 -я биты управляющего кода. Далее сигнал поступает на AMP1 (усилитель 1), отвечающий за усиления сигнала (максимальный сигнал +/- 10В).

За работу AMP1 отвечают 6-я и 7-я биты управляющего кода. После AMP1 сигнал поступает на AMP2, отвечающий за диапазон входного сигнала на аналого-цифровой преобразователь ADC. Усилителем 2 управляют 9-я и 8-я биты управляющего кода. Схема обработки аналогового сигнала представлена на рис. 230.

Можно составить таблицу для кода конфигурации представленного в шестнадцатеричной системе счисления (табл. 59).

В программе PLAST для записи кода конфигурации был использован массив wConfigChannel, состоящий из восьми элементов. Каждый элемент соответствует коду конфигурации для каждого активированного канала.

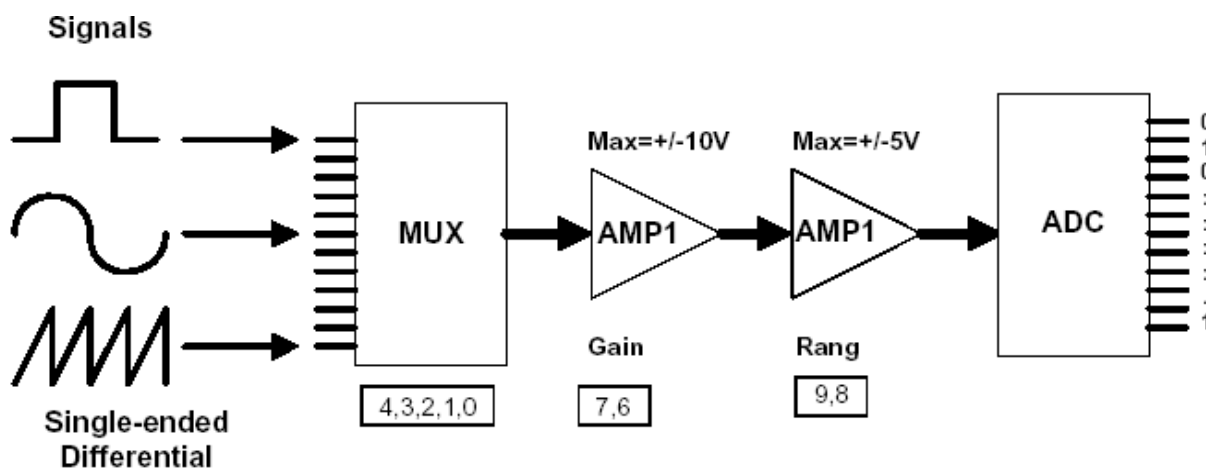


Рис. 230. Схема обработки аналогового сигнала

В программе PLAST для записи кода конфигурации был использован массив wConfigChannel, состоящий из восьми элементов. Каждый элемент соответствует коду конфигурации для каждого активированного канала.

Таблица кодов конфигурации

Для режима L			
Сигнал	Диапазон входного сигнала, В	Коэффициент усиления	Код конфигурации
Двухполюсный сигнал	+/- 5	1	0x00
Двухполюсный сигнал	+/- 2.5	2	0x01
Двухполюсный сигнал	+/- 1.25	4	0x02
Двухполюсный сигнал	+/- 0.625	8	0x03
Двухполюсный сигнал	+/- 10	0.5	0x04
Двухполюсный сигнал	+/- 5	1	0x05
Двухполюсный сигнал	+/- 2.5	2	0x06
Двухполюсный сигнал	+/- 1.25	4	0x07
Однополюсный сигнал	0~10	1	0x08
Однополюсный сигнал	0~5	2	0x09
Однополюсный сигнал	0~2.5	4	0x0A
Однополюсный сигнал	0~1.25	8	0x0B
Для режима H			
Двухполюсный сигнал	+/- 5	1	0x10
Двухполюсный сигнал	+/- 0.5	10	0x11
Двухполюсный сигнал	+/- 0.05	100	0x12
Двухполюсный сигнал	+/- 0.005	1000	0x13
Двухполюсный сигнал	+/- 10	0.5	0x14
Двухполюсный сигнал	+/- 1	5	0x15
Двухполюсный сигнал	+/- 0.1	50	0x16
Двухполюсный сигнал	+/- 0.01	500	0x17
Однополюсный сигнал	0~10	1	0x18
Однополюсный сигнал	0~1	10	0x19
Однополюсный сигнал	0~0.1	100	0x1A
Однополюсный сигнал	0~0.01	1000	0x1B

### *Регистрация сигналов. Программа PLAST*

Программа PLAST написана на языке программирования Delphi. Программа предназначена для регистрации сигналов, поступающих с датчиков. Система регистрирует сигнал в виде напряжения.

Работа с программой строится следующим образом:

- настройка отчета об испытании;
- настройка карты сбора информации;
- настройка режима сбора;
- непосредственно запуск сбора;
- просмотр и сохранение полученных данных.

Рассмотрим стадии работы с программой подробнее.

Настройка отчета об испытании является необязательной стадией выполнения программы. Настройка отчета осуществляется в окне «Паспорт», окно показано на рис. 231.

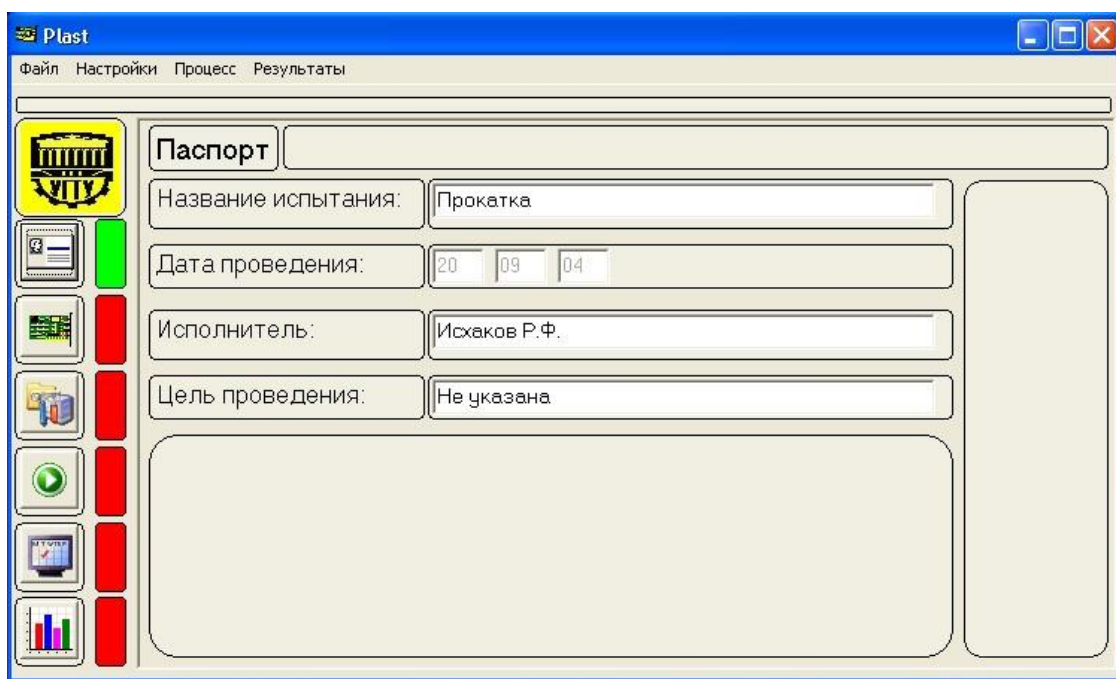


Рис. 231. Окно «Паспорт»

Заполнение существующих полей необязательно и несет только информационный характер.

Настройка карты сбора информации осуществляется в окне «Настройка карты», которое показано на рис. 232.

Настройка карты состоит из выбора каналов, с которых будет считываться информация, т.е. с активных каналов. Активация каналов производится в столбике «Активируйте каналы». Обязательным условием для работы программы является выбор одного или более каналов.

Также необходимо выбрать приблизительный диапазон входного сигнала. Диапазон входного сигнала необходимо выбирать с таким условием, чтобы входной сигнал не превышал установленного диапазона. По умолчанию уровень входного сигнала составляет  $\pm 5$  В. Заполнение остальных полей является необязательным условием и носит только информационный характер.

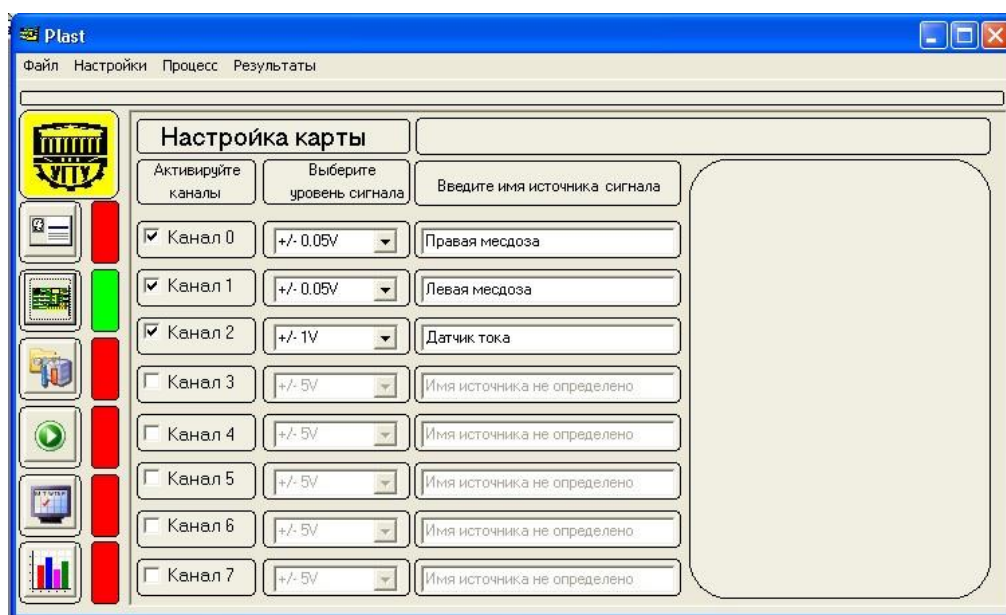


Рис. 232. Окно «Настройка карты»

Настройка режима сбора осуществляется в окне «Настройка работы», которое показано на рис. 233.

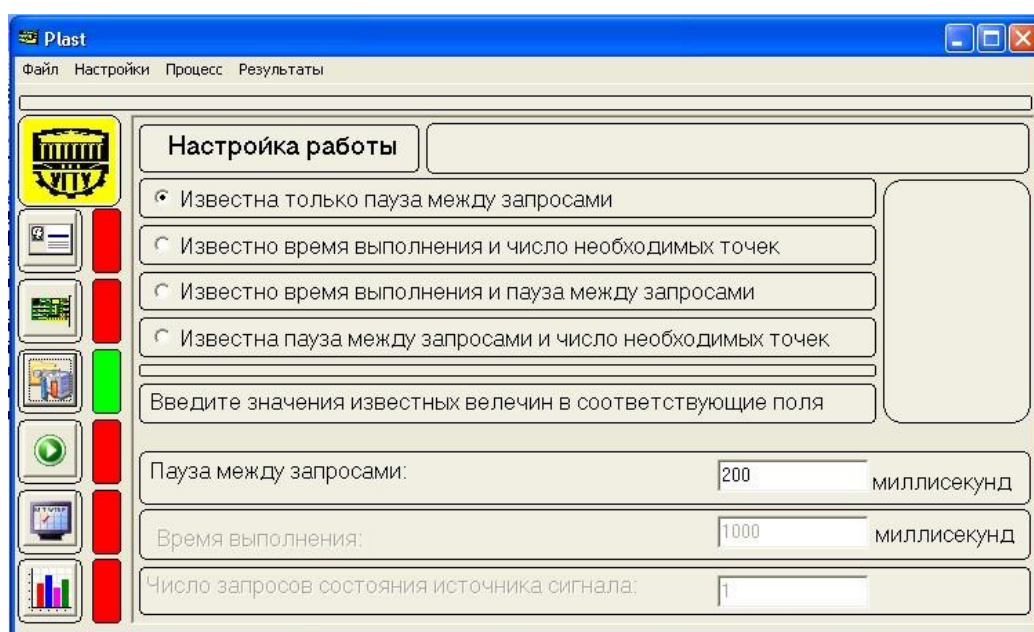


Рис. 233. Окно «Настройка работы»

Настройка работы может выполняться в четырех режимах в зависимости от имеющихся данных об организации испытания: известна только пауза между запросами; известно время выполнения и число необходимых точек; известно время выполнения и пауза между запросами; известна пауза между запросами и число необходимых запросов.

В зависимости от выбранного режима активируются или деактивируются поля для ввода: пауза между запросами; время выполнения; число запросов источников сигнала, – которые необходимо заполнить. В поля необходимо вводить целые положительные числа.

Непосредственно запуск сбора информации осуществляется в окне «Выполнение захвата сигналов», которое показано на рис. 234.

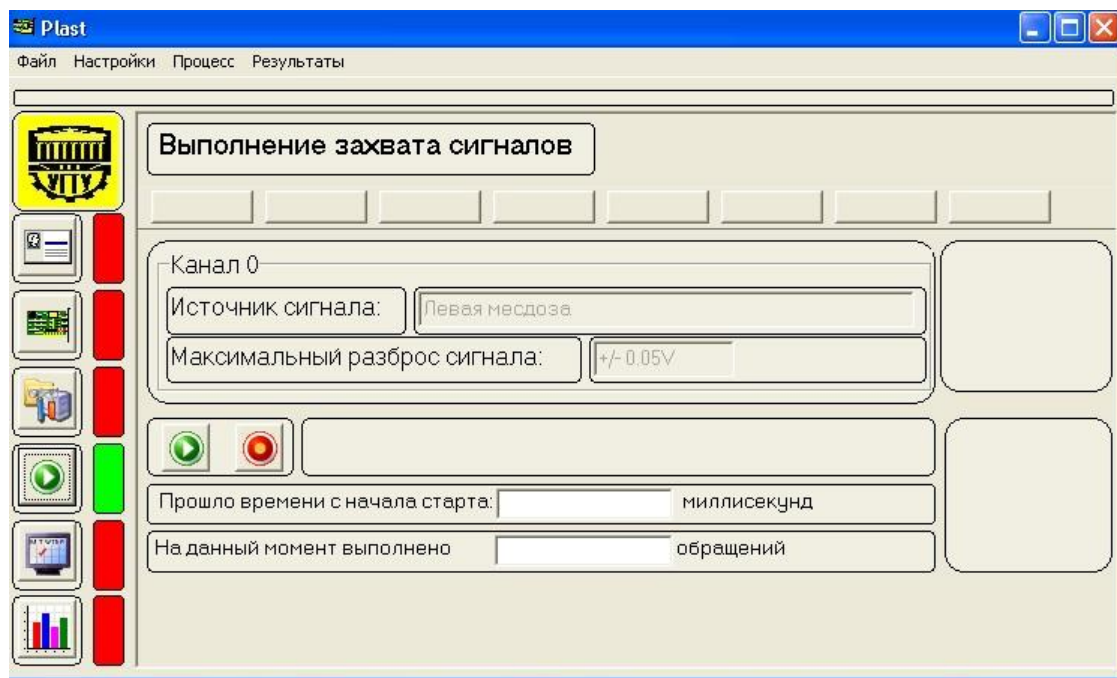


Рис. 234. Окно «Выполнение захвата сигналов»

В этом окне происходит запуск и остановка процесса сбора информации. Данное окно отображает ход событий во время процесса: отображается время, прошедшее с начала сбора, и число уже произведенных обращений к каждому каналу. Процесс можно прервать в любое время, в независимости от выбранных параметров, что в дальнейшем отразится в отчете.

В меню «Файл» подменю «Сохранить» служит для сохранения полученной информации. В директории, в которой находятся программы, создается поддиректория «\Files», в которую помещается текстовый файл отчета. Имя текстового файла отчета формируется исходя из названия испытания, времени проведения и генерируется автоматически системой.

В меню «Результаты» подменю «Таблица» и «Графики» предназначены для просмотра массива полученных данных для каждого канала в отдельности.

Программа регистрации сигналов производит захват аналогового сигнала, обработку и АЦП. В качестве единицы измерения исходной величины выступают милливольты.

### **8.2.6. Техническая характеристика ротационного пластометра**

– Материалы для пластометрических испытаний	Сплавы алюминия и магния
на кручение	
– Температура нагрева образцов, °С	до 500
– Время нагрева, с	10...60
– Диаметр образца меньшего сечения, мм	10,0 <sup>±0,03</sup>
– Диаметр образца большего сечения, мм	(10,2...12,0) <sup>±0,03</sup>
– Длина рабочей части образца, мм	5...30
– Полная длина образца, мм	70±0,2
– Место установки пластометра	Токарный станок 1А616
– Способ включения фрикционной муфты	Электромагнитный
– Диапазон частот вращения шпинделя, об/мин	8...1800
– Рекомендуемый к практическому использованию диапазон частот вращения шпинделя, об/мин	8...710
– Мощность источника питания, кВт	30
– Максимальный вторичный ток, А	5000
– Диапазон регулирования вторичного напряжения, В	0...20
– Реализуемая скорость деформации при длине рабочей части образцов, с <sup>-1</sup> :	
30 мм	0,008...1,2
20 мм	0,012...1,8
10 мм	0,024...3,6
5 мм	0,048...7,2
– Угол закручивания образца	не ограничен
– Число циклов нагружения	не ограничено
– Минимальная пауза между циклами нагружения, с	0,5

### **8.3. Совершенствование конструкции и методики проведения пластометрических испытаний**

#### **8.3.1. Конструктивные недостатки созданного торсионного пластометра**

При монтаже, настройке и проведении пробных испытаний на ротационном пластометре, описанном в разд. 8.2, выявлен ряд конструктивных и эксплуатационных недостатков, не позволяющих в полной мере отладить методику пластометрических исследований для определения сопротивления металлов и сплавов сдвиговой деформации и пластичности при упруго-пластическом кручении (см. рис. 211-214).

1. Образцы для испытаний на кручение с головками плоско-овальной формы поперечного сечения оказались нетехнологичными при механической обработке. Для их изготовления требуется прутковая заготовка диаметром не менее 22 мм. После токарной обработки рабочей части и головок образца требуется достаточно точная выверка оси при установке на фрезерный или строгальный станок. В итоге при механической обработке фрезерование занимает до 70 % времени изготовления. На существующем достаточно старом металлорежущем оборудовании лаборатории обеспечение требуемой параллельности плоских граней головок образца проблематично и увеличивает трудозатраты и время обработки.

2. Неудачна конструкция зажимных устройств как активного, так и пассивного захватов. Резьбовой хвостовик активного захвата 11, снабженный диаметрально калиброванным пазом и зажимной гайкой 13, не обеспечил надежного электрического контакта захвата с образцом, что при включенном питании провоцирует местный разогрев головки образца и захвата в точках контакта. Этот разогрев приводит к окислению поверхности паза медного захвата и к увеличению сопротивления контакта. Более надежный электрический контакт в активном захвате удалось обеспечить после изготовления слабokonической резьбы на концевике захвата. После ввода плоскоовальной головки образца в паз прижим поверхностей достигался набеганием гайки 13 на слабokonический резьбовой хвостовик захвата. Однако

из-за большого момента трения в резьбовой паре наблюдаются задиры резьбы и ее быстрый износ.

Конструктивным недостатком пассивного захвата, когда выполнен глухой плоскоовальный паз, в который вводится головка образца соответствующей формы сечения и прижимается к одной стороне паза винтом 14, является нарушение центровки образца. Для облегчения ввода головки в паз последний выполняется с обеспечением зазора между захватом и гранью головки образца. При затяжке винта 14 головка смещается, отклоняя ось образца. Итогом этого является быстрая потеря устойчивости рабочей части образца при кручении и, следовательно, невозможность анализировать свойства материала при больших пластических деформациях.

3. При установке новых образцов в захваты приходится поднимать пассивные захваты на высоту более двойной длины головки образца (более 40 мм при запроектированной конфигурации и размерах образцов). Для подъема пассивного захвата 15 необходимо расконтрить гайки 43, вывернуть шпильки 40 из кронштейна 39, снять датчики измерения температуры 50. При этом нарушается исходная балансировка мостовых схем тензодатчиков измерителей разности крутящих моментов и температуры образцов. Следовательно, после установки и закрепления образцов необходимо в обратном порядке произвести сборку и восстановить «нули» измерительных систем, на что требуются значительные затраты времени, в итоге – снижение производительности при проведении исследований, требующих многократного дублирования испытаний для повышения статистической надежности получаемых результатов.

4. Медно-графитовая порошковая набивка 49 в расточках фланцев 6, обеспечивающая электрический контакт между активными захватами 11 и контактной пластиной, при слабом уплотнении создает большое и нестабильное электрическое сопротивление, а при большом уплотнении приводит к быстрому износу концевых частей валов активных захватов. Нестабильность сопротивлений затрудняет регулирование напряжений при параллельном подключении образцов к источнику питания. Повышенное сопротивление этих контактов при последовательном включении образцов требует увеличения напряжения на вторичной обмотке трансформатора. Технические возможности системы регулирования напряжения таммановского трансформатора ограничивают температуру и скорость нагрева образцов. Дли-



тельный нагрев при сравнительно низком напряжении питания приводит к недопустимо высокому нагреву подшипников 8 установки валов активных захватов.

5. Неудачными и неудобными в эксплуатации оказались конструкция и способ крепления мессдоз-измерителей 50 температуры нагрева образцов. При установке образцов из-за необходимости подъема пассивных захватов приходится выводить из пазов концевики пластин, а после завершения операции замены образцов – производить заново балансировку мостовой тензометрической схемы и программным способом устанавливать «нули» отсчета. Кроме того, заземление концов пластины 50 с наклеенными на их поверхности датчиками посредством болтов 46 проявилось во влиянии усилия затяжки на положение «нулей» и даже на чувствительность мессдоз-измерителей температуры. В конструкции измерителей не был предусмотрен регулирующий элемент, позволяющий создавать предварительный изгиб пластин, а зазор в пазах рычагов 18 породил люфты и существенную ошибку в измерении величины осевого смещения пассивных захватов при нагреве образцов.

6. Не удалось установить трансформатор системы электропитания в непосредственной близости от пластометра, что потребовало увеличения длины токоподводящих проводов 17 пассивных захватов. Сопротивление цепей токоподвода значительно превысило расчетное значение и потребовало повышения напряжения вторичной цепи трансформатора. Напряжение при технически приемлемой скорости нагрева образцов приближается к верхнему пределу регулирования. В итоге возникло существенное ограничение в диапазоне управления скоростью нагрева.

7. Проявилось конструктивное несовершенство токоподводящих проводов 17, запаянных одним концом в торцевых расточках пассивных захватов, а другим – в расточки клемм, закрепляемых болтами на плоских медных шинах трансформатора. Конструкция клемм не позволяет снять рычаги 18 с хвостовиков пассивных захватов 15 без распайки проводов 17, что затрудняет проведение регламентных работ на пластометре.

8. Корпуса рычагов 18, изготовленные из текстолита, не позволили обеспечить их надежное крепление на торцах медных пассивных захватов. Быстро возникающий окружной люфт в креплениях рычагов порождает ошибки в задании требуемых углов скручивания при изучении свойств металлов при малых упругопластических деформациях. Углы скручивания образцов оказываются различными при наличии различных по величине люфтов в креплениях рычагов. Это противоречит одному из основных условий проведения крутильных испытаний дифференциальным методом.

9. Отсутствие креплений и штифтовой фиксации распорок 52 создает трудности в сборке нижней поперечины, а отсутствие фиксации втулки 35 усложняет настройку осевого положения упорного центра 30.

10. Отсутствие электрической изоляции корпуса пластометра и червяка от станины и патрона токарного станка, связанных заземляющим приводом с «нулем» трехфазной цепи, привело к нарушению гальванической развязки первичной и вторичной цепей трансформатора и проявилось в нестабильности работы тиристорного управления первичного напряжения.

### ***8.3.2. Конструктивные изменения, внесенные в новый вариант торсионного пластометра***

Выявленные конструктивные недостатки спроектированного и изготовленного в первом варианте пластометра не влияют на принципиальную возможность реализации при испытаниях на кручение дифференциального метода. Однако их устранение и конструктивная доработка упрощают эксплуатацию торсионного пластометра, облегчают периодическое проведение регламентных работ и повышают производительность пластометрических исследований. Изменение конфигурации испытуемых образцов снижает трудозатраты при их изготовлении, экономит материал и повышает точность осевой установки образцов в захватах перед проведением испытаний на кручение.

Новый конструктивный вариант представлен на рис. 228-231. Новый торсионный (ротационный) пластометр изготовлен в полном соответствии с представленной рабочей конструкторской документацией.

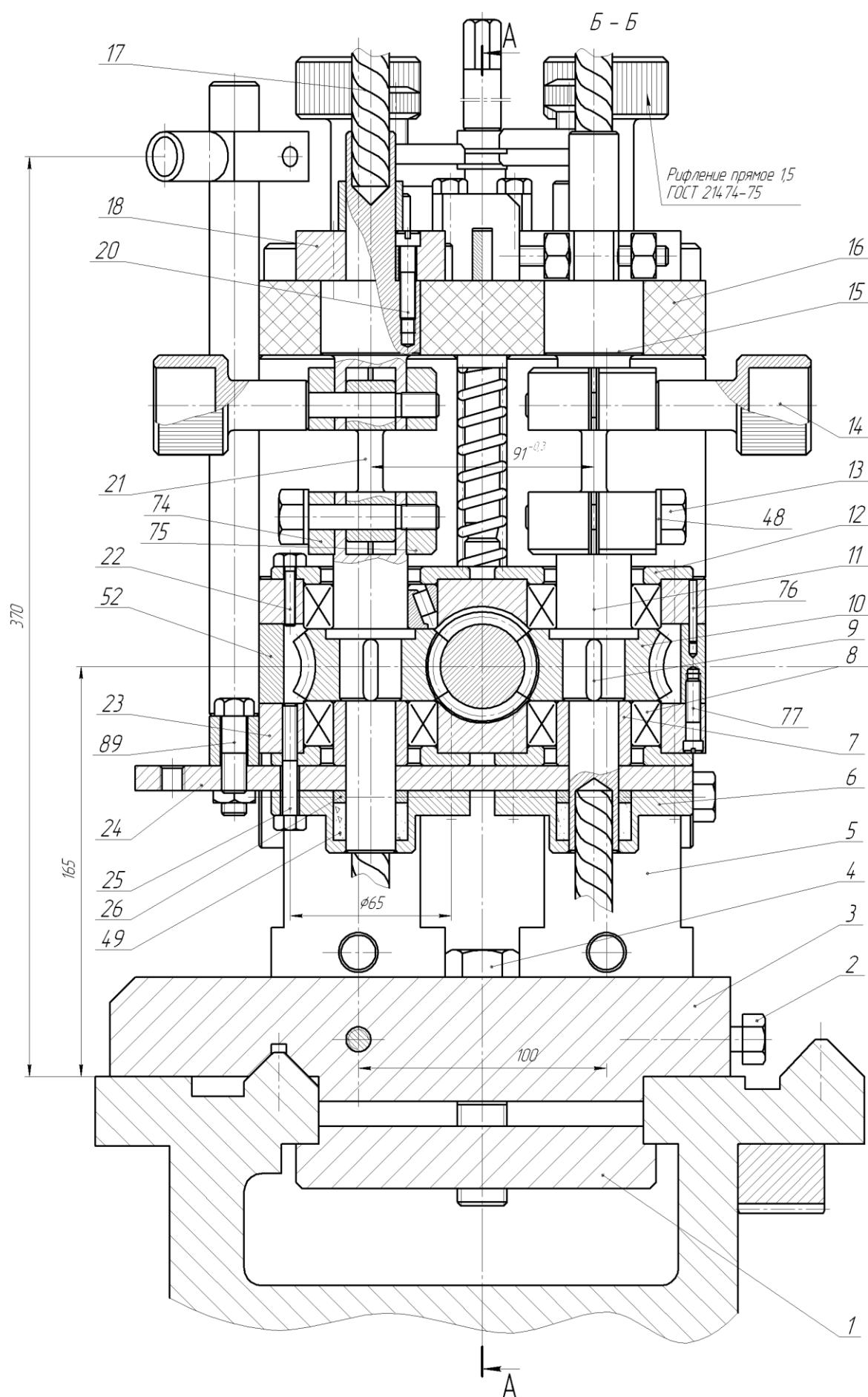


Рис. 228. Поперечный разрез реконструированного пластометра

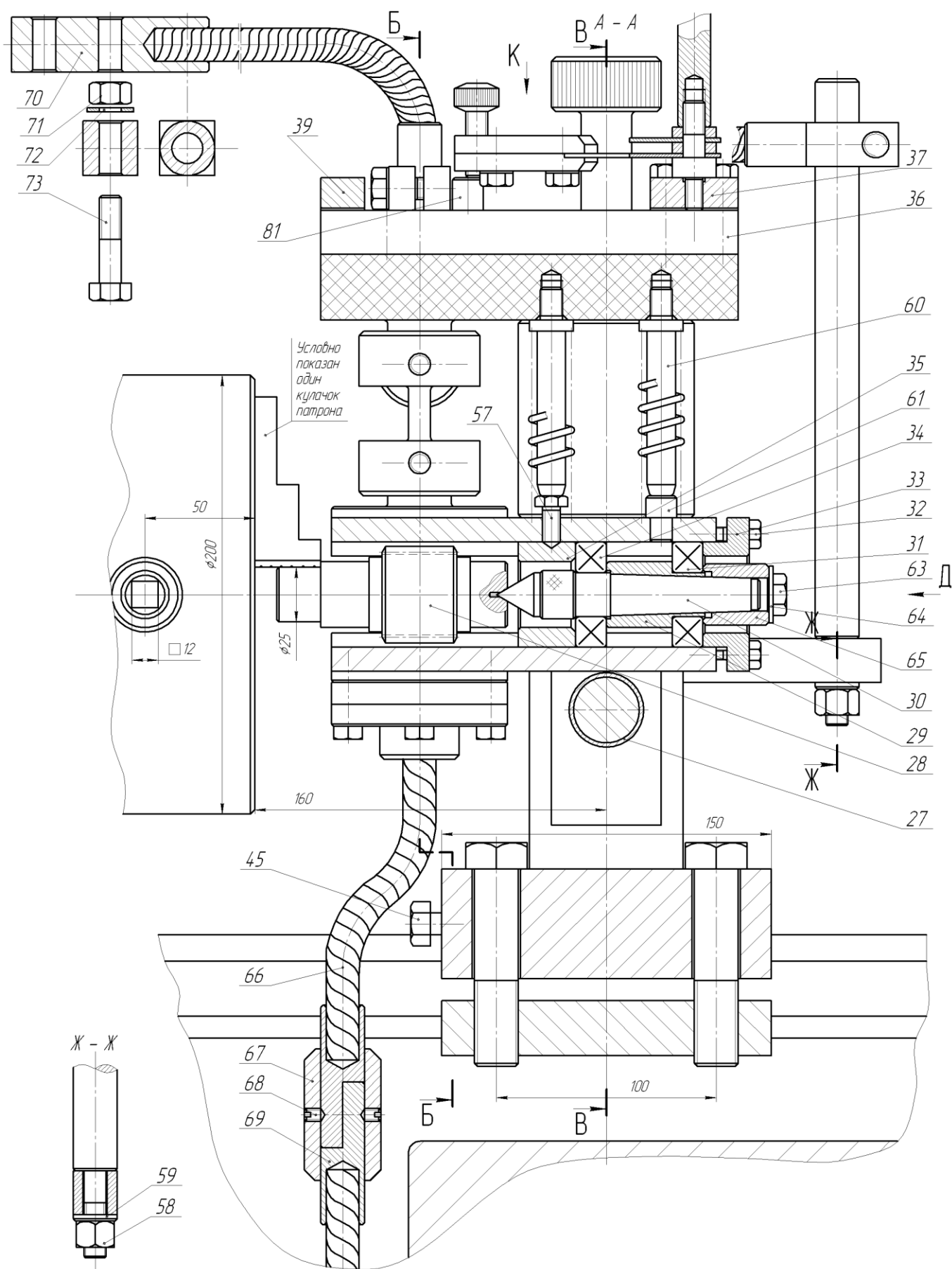


Рис. 229. Продольный разрез пластометра после реконструкции

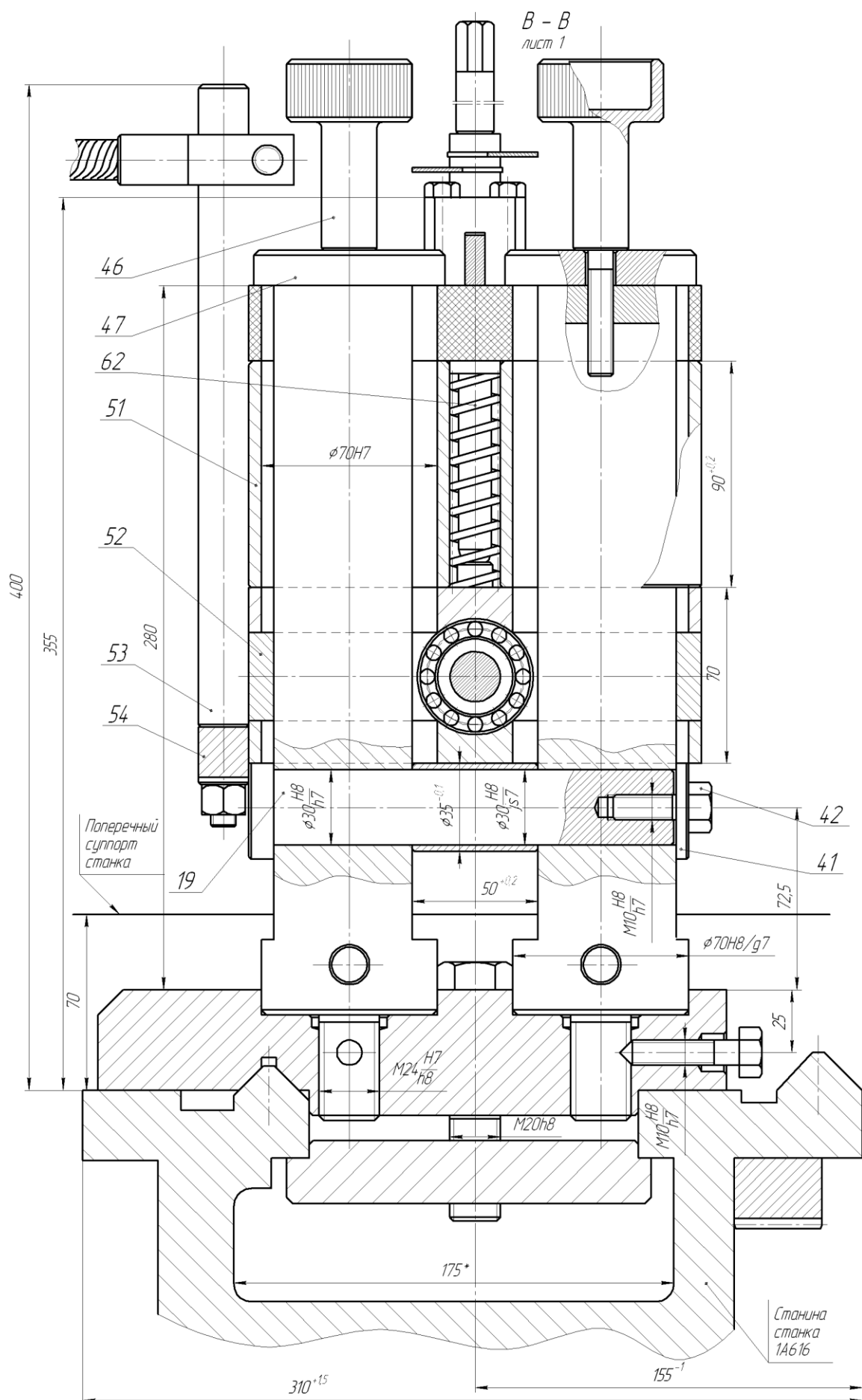


Рис. 230. Поперечный разрез В-В (см. рис. 229)

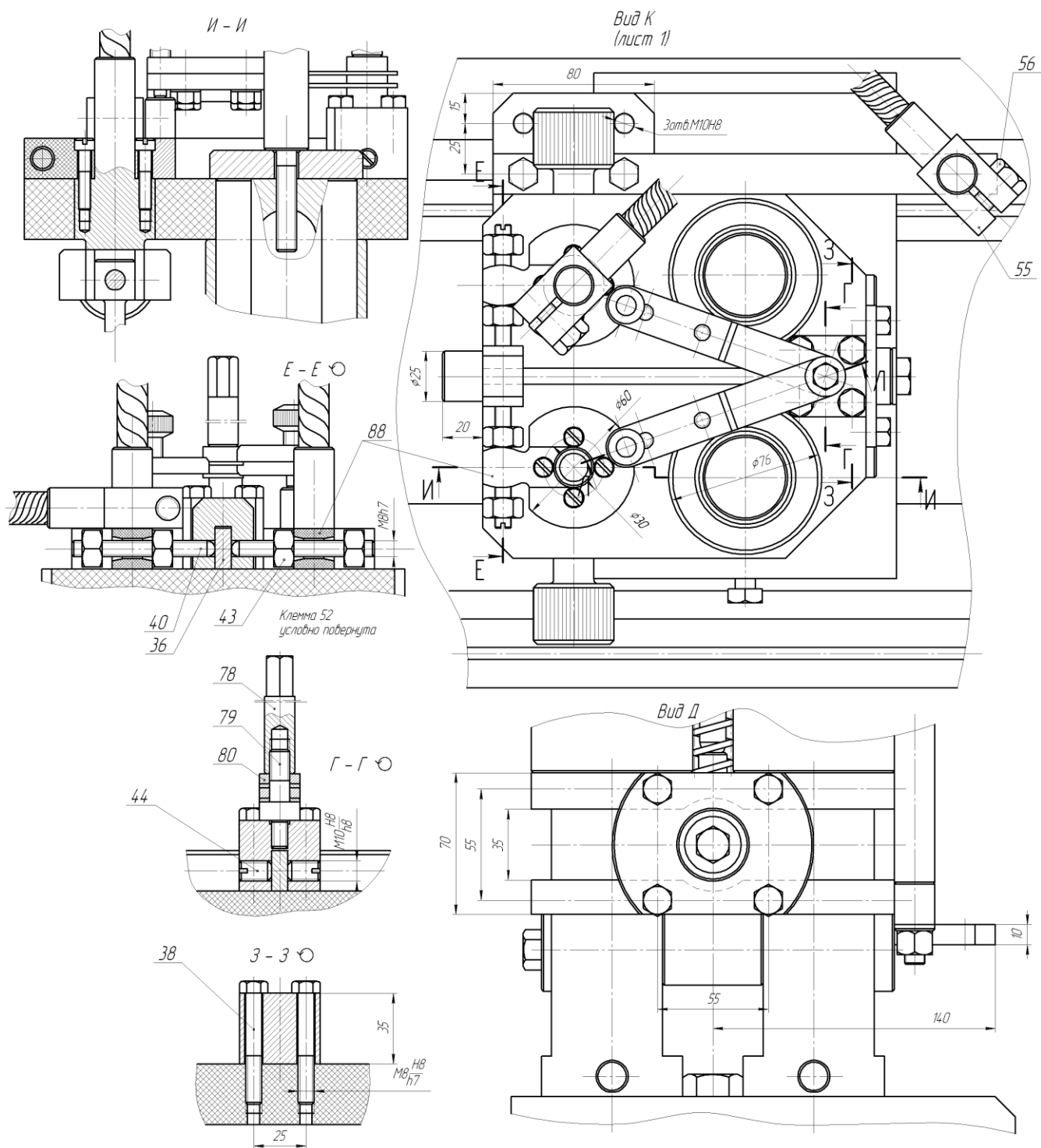


Рис. 231. Вид сверху на реконструированный пластометр

Внешний вид комплекса оборудования торсионного пластометра после реконструкции показан на рис. 232.



*а*



*б*



*в*



*г*

Рис. 232. Внешний вид пластометра: *а* – пластометр и система автоматизированного сбора, обработки и хранения информации; *б* – источник питания системы электроконтактного нагрева пластометра; *в* – собственно торсионный (ротационный) пластометр; *г* – испытуемые образцы в захватах пластометра (внизу активные захваты)

При испытаниях на кручение на новом пластометре используются цилиндрические образцы с цилиндрическими головками, просверленными на заданном расстоянии в одной плоскости, проходящей через технологическую ось образца. Внешний вид пары образцов с различными диаметрами рабочей части, изготовленных из сплава АМг 5, показан на рис. 233. Образцы изготавливаются из прутковой заготовки диаметром не менее 22 мм или из цилиндрических мерных заготовок диаметром не менее 23 мм и длиной не менее 70 мм. Целесообразными к применению для испытаний на кручение дифференциальным методом являются образцы с наименьшим диаметром 10 мм и наибольшим – 12 мм. Различие площадей поперечных сечений образцов испытываемой пары не должно превышать 30 % и быть не менее 10 %, что определяется чувствительностью измерительной системы.

Отверстия в образцах выполняются в специально созданном кондукторе, описанном в п.8.3.4.



Рис. 233. Внешний вид образцов для испытаний на кручение дифференциальным методом

Изменение конфигурации и способа крепления образцов 21 повлекло соответствующее изменение конструкций как активных, так и пассивных захватов. Активный медный захват 11, представляющий вал привода с установленным на нем червячным колесом 10 и зафиксированный в нижней поперечине 23 посредством подшипников 8, снабжен в верхней части осевой цилиндрической расточкой диаметром 20Н8 мм и диаметральной прорезью шириной 2 мм, позволяющей зажимать головку образца с помощью болта 13, который проходит через отверстия полуколец 74 и 75. Полукольца охватывают цилиндрическую головку активного захвата с сохранением зазора по плоскостям разъема. Головка захвата снабжена диаметральной сверлением, через которое пропускается болт 13. Таким образом, болт 13 одновременно пропущен через полукольца, головку захвата и образец и позволяет без люфта закрепить головку образца в захвате и обеспечить надежный электрический контакт. В нижнем хвостовике вала активного захвата выполнено глухое осевое отверстие диаметром 15 мм для впаивания замыкающего активные захваты провода 66.

Пассивный захват 15 в месте крепления головки образца имеет идентичную с активным конструкцию за исключением установки зажимных винтов 14 вместо болтов 13. Возможность использования винтов 14 определяется относительной неподвижностью этих захватов. Контактные хвостовики пассивных захватов выполнены удлиненными для обеспечения возможности установки на них двух контактных клемм.

Выполненная конструкция захватов исключила отклонение осей образцов при их зажиме и потерю устойчивости при больших углах



скручивания. В то же время фиксация образцов болтами 13 и винтами 14 ужесточила требования к точности выполнения диаметральных отверстий диаметром 10Н7 мм в головках образцов, что потребовало разработки специального кондуктора.

Изменилась процедура смены образцов, которая в предыдущем конструктивном исполнении пластометра требовала разборки узла крепления пассивных захватов в верхней поперечине 16. В новом исполнении использована возможность осевого смещения (подъема) верхней поперечины 16 вдоль колонн 5. Симметрично плоскости колонн 5 на стержнях 60, жестко закрепленных на поперечине 16, установлены пружины сжатия 62, поднимающие поперечину 16 со всеми закрепленными на ней узлами при отвинчивании стяжных винтов 46. Резьбовые хвостовики винтов 46, помещенные в осевые отверстия колонн 5, позволяют пружинам 62 поднять поперечину 16 на высоту более 40 мм, т.е. на высоту большую суммарной длины головок образцов. Гибкие провода токоподвода 17 и все элементы измерительной системы не препятствуют этому подъему. Настройка мессдоз на «нули» отсчета сохраняется и не требует корректировки после установки очередной пары испытуемых образцов. Последние сначала устанавливаются в активные захваты и фиксируются болтами 13. Затем одновременным закручиванием винтов 46 пассивные захваты вместе с поперечиной 16 опускаются на свободные головки образцов. Совмещение отверстий пассивных захватов и головок образцов достигается ручным поворотом активных захватов. После совмещения отверстий головки образцов фиксируются в пассивных захватах винтами 14. После завершения испытаний образцы извлекаются из захватов в обратном порядке.

В модернизированной конструкции пластометра медно-графитовая набивка 49 в расточке фланцев 6 сохраняется и используется в качестве контактного элемента только при параллельном присоединении испытуемых образцов к источнику питания, когда средняя точка вторичной обмотки трансформатора соединяется с контактной пластиной 24. Контактная пластина в этом случае играет роль средней точки цепей образцов. Возможна нестабильность сопротивлений контактов скольжения при вращении активных захватов 11. Это приводит к нарушению первоначальной настройки системы электропитания, при которой за счет установки средней точки вторичной обмотки трансформатора выравнены плотности токов в рабочих частях образцов. Поднастройка трансформатора в процессе

нагрева образцов достаточно сложная, поэтому при организации пластометрических исследований предпочтение отдано последовательному подключению образцов, при котором выравнивание плотностей токов достигается настройкой, шунтирующей образец меньшего диаметра цепи, включающей в себя ригель 54, стойку (собственно шунт) 53 и провод с двумя накидными клеммами 55. В этом случае нестациональность сопротивления медно-графитовой набивки не имеет принципиального значения, поскольку эти скользящие контакты также подключаются последовательно. Следовательно, токи в цепях образцов всегда одинаковы. Однако общее сопротивление последовательной цепи и, следовательно, напряжения на клеммах вторичной обмотки трансформатора выше, чем при параллельном включении. Анализ показал, что сопротивление участка цепи между нижними концами валов активных захватов достаточно велико и напряжение питания при технически приемлемой скорости нагрева образцов близко к максимальному.

С целью уменьшения сопротивления последовательной цепи образцов в нижних хвостовиках активных захватов 11 выполнены торцевые расточки диаметром 15 мм, в которые введены и впаяны провода 66, на концах которых установлены разъемные клеммы 69, соединяемые при сборке клеммной втулкой 67. Надежный контакт разъемных клемм обеспечивается их взаимным прижимом винтами 68. Конструкция разъемных клемм позволяет без распайки проводов 66 демонтировать валы активных захватов 11.

Разъемные клеммы идентичной конструкции установлены и на проводах токоподвода пассивных захватов, что позволяет без распайки этих проводов устанавливать и снимать накидную клемму 55, а также демонтировать корпуса рычагов 18.

Установка торцевых проводов 66 на активные захваты уменьшила и стабилизировала сопротивление последовательной цепи.

Новое конструктивное исполнение измерителя температуры нагрева образцов по величине их термического удлинения показано на рис. 234. Упругая пластина 50, на поверхности которой наклеены тензодатчики, одним концом заземлена на переходнике 79, жестко закрепленном на заднем кронштейне 37 (см. рис. 229), а противоположный конец зажат между пластинами 85 и 86, в которых установлен регулировочный винт 87, с его помощью возможны предварительное упругое деформирование пластины и установка «нулей» мессдоз. Винты упираются в опоры 81 и 82, изготовленные из неэлек-

тропроводного материала. Опоры, в свою очередь, закреплены на корпусах рычагов 18 (см. рис. 228). Верхние торцевые поверхности опор гладкие и трение на них не создает значимых деформаций пластин 50 при упругом повороте торсионов пассивных захватов во время скручивания образцов.

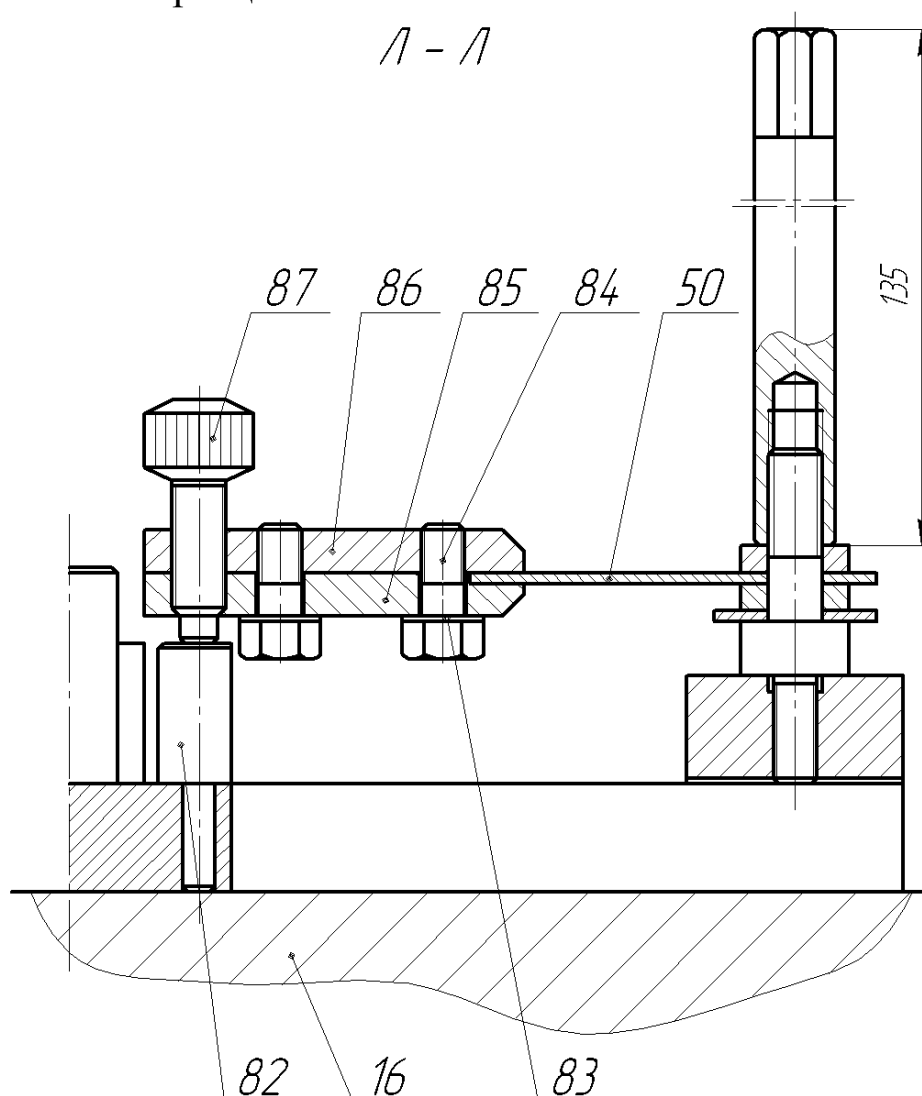


Рис. 234. Конструктивное исполнение измерителя температуры нагрева образцов на реконструированном пластометре

Оба температурных датчика через проставочные кольца 80 закреплены на одной опоре посредством стойки 78, на которую устанавливается индикатор часового типа для визуального контроля процесса нагрева образцов. Шток индикатора упирается в один из регулировочных винтов 87. Процедура тарировки температурных датчиков остается прежней, описанной в предыдущем отчете.

Поскольку вся система датчиков в силовом отношении замкнута на верхней поперечине 16, при подъеме последней не происходит на-

рушения настройки «нулей» мессдоз, что в значительной степени облегчает и ускоряет пластометрические исследования.

Для уменьшения общего сопротивления внешних электрических цепей введено дублирование проводов токоподвода к пассивным захватам. Изготовлены дополнительные провода с концевыми клеммами накидной (конструктивно идентичной 55) и прижимной 70. Первая надевается на удлиненный хвостовик пассивного захвата 15, а вторая крепится болтами 73 к плоской токоподводящей медной шине трансформатора. Установка двух параллельных проводов позволила существенно снизить вторичное напряжение трансформатора и расширить диапазон управления скоростью нагрева образцов.

Провода токоподвода пассивных захватов выполнены составными. Одна часть провода, впаянная в торцевую расточку хвостовика захвата 15, на противоположном конце снабжена разъемной клеммой типа 69. Вторая часть провода на одном конце имеет контрклемму типа 69, а на втором прижимную клемму типа 70, закрепляемую на плоской шине трансформатора.

Изменена конструкция рычагов 18. Корпуса рычагов стальные и закрепляются винтами 20 к торсионам пассивных захватов 15. В корпусах выполнены прямоугольные радиальные пазы, в них по прессовой посадке установлены собственно рычаги 88, через отверстия в которых пропущены упорные винты 40, связывающие в одну силовую цепь рычаги и передний кронштейн 39 мессдозы 36. Рычаги 88 изготовлены из неэлектропроводного материала и исключают электрическое замыкание хвостовиков пассивных захватов. Кроме прессовой посадки в пазу корпуса 18 рычаг дополнительно закреплен на торсионе захвата винтом 20.

В узле установки упорного центра 30 дополнительно зафиксирована осевая позиция распорной втулки 35 с помощью болта 58. Кроме того, установлена с посадкой на коническую поверхность центра 30 упорная втулка 65. Натяг обеспечивается болтом 63, ввернутым в резьбовое отверстие центра и упирающимся через шайбу 31 в торец упорной втулки.

Электрическая развязка первичной и вторичной цепей питания достигнута изоляцией корпуса пластометра от станины и патрона токарного станка. С этой целью на направляющие суппорта 3 установлены целлулоидные прокладки толщиной 0,3 мм. На хвостовик червяка 28, зажимаемый кулачками патрона, напрессована тонкостенная (0,6 мм) капроновая втулка, позволяющая применять достаточное для

передачи крутящего момента усилие зажима хвостовика кулачками. Ригель *1* изолирован от суппорта *3* установкой электроизолирующих втулок и шайб на болты *4*.

### 8.3.3. Допустимые схемы подключения источника питания к торсионному пластометру

Параллельное подключение образцов, показанное на рис. 235, позволяет существенно снизить общее сопротивление внешних цепей, уменьшить вторичное напряжение трансформатора и увеличить скорость нагрева образцов при ограниченном диапазоне регулирования вторичного напряжения таммановского трансформатора.

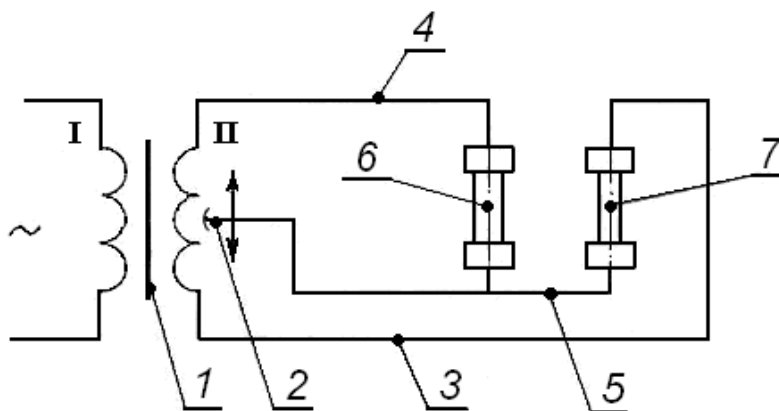


Рис. 235. Схема параллельного подключения образцов к источнику питания:  
*1* – трансформатор; *2* – подвижный средний контакт вторичной обмотки;  
*3, 4* – провода токоподвода к пассивным захватам; *5* – контактная пластина хвостовиков активных захватов; *6* – образец большего диаметра;  
*7* – образец меньшего диаметра

Плотности токов, обеспечивающие равномерный нагрев обоих образцов, регулируются смещением подвижного контакта *2* вдоль витков вторичной обмотки трансформатора, выполненного плоской медной шиной. Система электроконтактного нагрева параллельного включения работает устойчиво при стабильном сопротивлении скользящих контактов активных захватов. Добиться этого в приведенной конструкции трудно, а поднастройка делителя напряжения вторичной обмотки трансформатора практически невозможна. Поэтому от данной схемы при проведении испытаний пришлось отказаться, хотя принципиальная возможность ее использования сохранена.

Используемое на практике последовательное подключение образцов для электроконтактного нагрева, показанное на рис. 236, несмотря на увеличение общего сечения проводов токоподвода пассивных захватов и установки замыкающего хвостовика валов активных захватов дополнительного провода, сужает диапазон регулирования скорости нагрева образцов из-за сравнительно высокого (6...10 В) напряжения вторичной цепи.

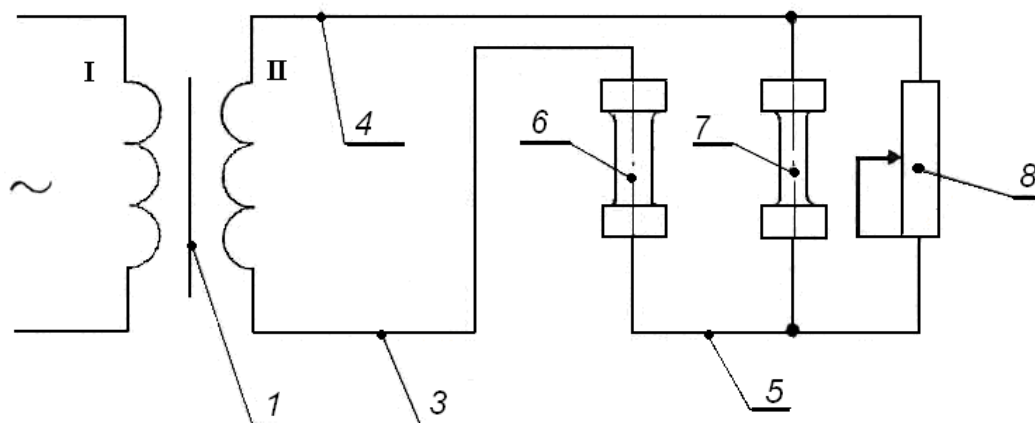


Рис. 236. Схема последовательного подключения образцов к источнику питания: 1 – трансформатор; 3, 4 – провода токоподвода к пассивным захватам; 5 – дополнительный провод, замыкающий активные захваты; 6 – образец большего диаметра; 7 – образец меньшего диаметра; 8 – регулируемая шунтирующая цепь образца меньшего диаметра

В представленном конструктивном исполнении шунтирующая цепь, включающая ригель, стойку и провод, имеет сравнительно малый диапазон регулирования сопротивления и рассчитана на применение образцов большего диаметра от 11 до 12 мм и меньшего диаметра 10 мм. При отклонении от этого диапазона необходимо изменить конструкцию шунтирующей цепи.

При сравнительно небольших углах закручивания образцов, но достаточных для анализа сопротивления деформации при промышленно применяемых степенях деформации, проблема выравнивания плотностей тока и скоростей нагрева образцов успешно решается применением полого образца большего диаметра и сплошного образца меньшего диаметра. Образец большего диаметра с осевым сверлением строго заданного диаметра  $d_0$  показан на рис. 237.

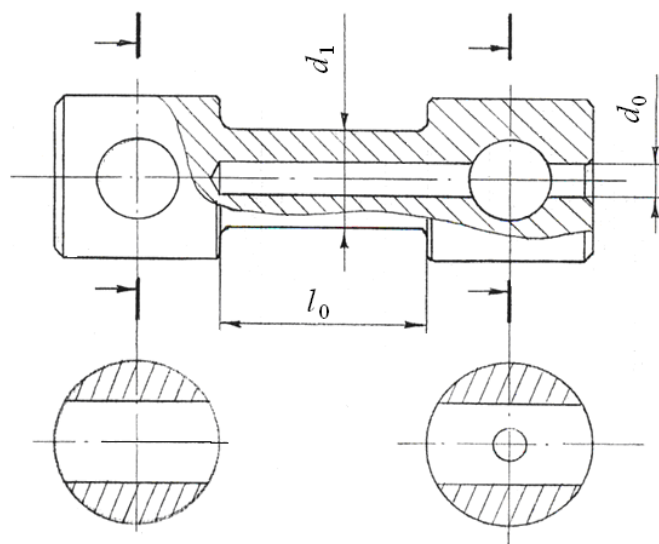


Рис. 237. Полый образец для испытаний на кручение  
дифференциальным методом

Если испытываемые образцы имеют диаметры  $d_1$  и  $d_2$ , причем  $d_1 > d_2$ , то диаметр отверстия, выполняемого по оси образца большего диаметра, равен

$$d_0 = \sqrt{d_1^2 - d_2^2}.$$

При высокой пластичности испытываемых сплавов применение полого образца для оценки предельной пластичности при показателе напряженного состояния  $\sigma/T = 0$  может приводить к потере устойчивости сечения. Поэтому данный метод можно считать перспективным при изучении влияния параметров пластической обработки на сопротивление деформации сдвига.

При использовании образца с осевым отверстием выравниваются плотности токов и скорости нагрева образцов, но изменяется методика определения сопротивления сдвиговой деформации  $\tau_s$  при разности крутящих моментов.

В общем случае  $\tau_s$  не остается постоянным по сечению образцов в условиях развитой упругопластической деформации. Поэтому по диаграмме записи разности крутящих моментов в функции угла скручивания  $\varphi$  легко устанавливается момент перехода упругого в упругопластическое кручение по положению границы между линейной и нелинейной частями графика  $\Delta M = f(\varphi)$ . При упругом кручении тангенциальное касательное напряжение  $\tau$  изменяется линейно по радиусу  $r$  сечений образцов. В момент перехода к упруго-

пластическому кручению поверхностное касательное напряжение  $\tau = \tau_{s0}$ . Этому моменту соответствует угол скручивания, рад,

$$\varphi = \frac{2\tau_{s0}l_0}{Gd},$$

где  $G = \frac{E}{2(1-\nu)}$  – модуль сдвига;  $E$  – модуль упругости первого рода;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $d$  – диаметр рабочей части образца;  $l_0$  – базовая длина образца, т.е. длина рабочей части, на которой фиксируется однородная деформация кручения (риска, нанесенная вдоль образующей образца, сохраняет постоянный угол наклона по отношению к оси образца).

На рис. 238 приведена расчетная схема распределения тангенциальных касательных напряжений в сечении образцов большего диаметра  $d_1 = 2r_1$  с осевым отверстием  $d_0 = 2r_0$  и меньшего диаметра  $d_2 = 2r_2$  без отверстия. При этом площади поперечных сечений образцов совпадают.

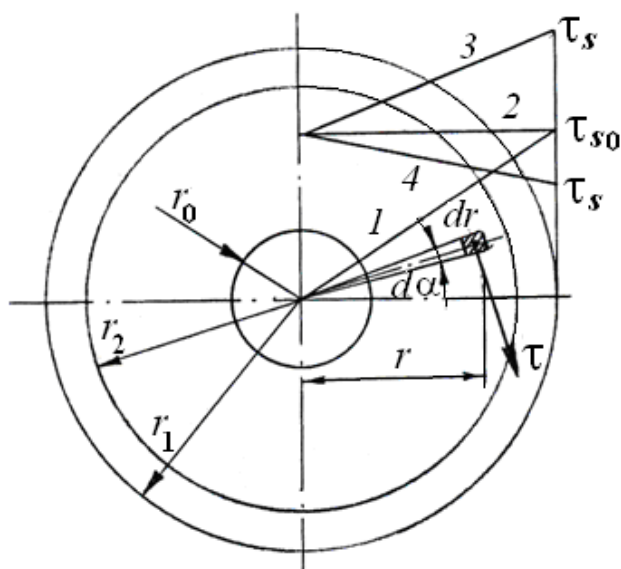


Рис. 238. Расчетная схема

На рисунке показаны четыре возможные эпюры распределения тангенциальных касательных напряжений  $\tau$  в функции  $r$ : 1 – линейное распределение  $\tau$  при упругом кручении в момент достижения  $\tau$  значения  $\tau_{s0}$  на цилиндрической поверхности образца большего диаметра  $d_1$ , т.е. при угле закручивания на базе  $l_0$   $\varphi = \frac{\tau_{s0}l_0}{G r_1}$ ; 2 – распределение касательных напряжений не зависит от  $r$  при развитом упру-



гопластическом кручении, когда область упругих напряжений в осевой зоне пренебрежимо мала; этот случай соответствует динамическому равновесию между скоростным упрочнением и динамическим разупрочнением за счет возврата и рекристаллизации; 3 – линейное распределение  $\tau_s$  по радиусу сечения образца, когда скоростное упрочнение превалирует над динамическим разупрочнением; 4 – распределение  $\tau_s$  в случае более активного разупрочнения (мала скорость деформации). Допускается, что при развитом упругопластическом кручении в центре сечения образца (на границе с упругой зоной) сопротивление деформации  $\tau_s = \tau_{s0}$ .  $\tau_{s0}$ , так же как и  $\tau_s$  при произвольном угле закручивания  $\varphi$ , может быть определено по результатам измерения разности крутящих моментов  $M_1 - M_2 = \Delta M$  в момент перехода от упругой к упругопластической деформации кручения. В первом случае (эпюра 1 на рис. 238)  $\tau = \tau_{s0} \frac{r}{r_1}$ .

Крутящий момент полого образца большего диаметра  $d_1$  определяется выражением

$$M_1 = \int_0^{2\pi} \int_{r_0}^{r_1} \tau_s \frac{r}{r_1} r d\alpha dr = 2\pi \frac{\tau_{s0}}{r_1} \int_{r_0}^{r_1} r^3 dr = \frac{\pi}{2} \tau_{s0} r_1^3 \left( 1 - \frac{r_0^4}{r_1^4} \right).$$

Крутящий момент образца меньшего диаметра  $d_2$  без отверстия при том же угле скручивания  $\varphi$

$$M_2 = 2\pi \frac{\tau_{s0}}{r_1} \int_0^{r_2} r^3 dr = \frac{\pi}{2} \tau_{s0} \frac{r_2^4}{r_1}.$$

Измеряемая разность крутящих моментов в этом случае

$$\Delta M = \frac{\pi}{2} \tau_{s0} r_1^3 \left( 1 - \frac{r_0^4}{r_1^4} - \frac{r_2^4}{r_1^4} \right).$$

Отсюда

$$\tau_{s0} = \frac{2 \Delta M}{\pi r_1^3 \left( 1 - \frac{r_0^4}{r_1^4} - \frac{r_2^4}{r_1^4} \right)}.$$

В случае развитого упругопластического кручения, когда можно принять  $\tau_s = \text{const}$ ,

$$M_1 = 2\pi \tau_s \int_{r_0}^{r_1} r^2 dr = \frac{2}{3} \pi \tau_s (r_1^3 - r_0^3); \quad M_2 = \frac{2}{3} \pi \tau_s r_2^3.$$

$$\Delta M = \frac{2}{3} \pi \tau_s (r_1^3 - r_2^3 - r_0^3).$$

Отсюда 
$$\tau_s = \frac{3 \Delta M}{2 \pi (r_1^3 - r_2^3 - r_0^3)} = \frac{12 (M_1 - M_2)}{\pi (d_1^3 - d_2^3 - d_0^3)}.$$

В случае, когда распределение  $\tau_s$  по сечению соответствует эпюрам 3 или 4 (рис. 238):

$$\tau = \tau_{s0} + (\tau_s - \tau_{s0}) \frac{r}{r_1}, \text{ эпюра 3}$$

$$\text{или } \tau_s = \tau_{s0} - (\tau_{s0} - \tau_s) \frac{r}{r_1}, \text{ эпюра 4.}$$

В этих случаях

$$\begin{aligned} M_1 &= 2 \pi \int_{r_0}^{r_1} \left( \tau_{s0} r^2 + \tau_s \frac{r^3}{r_1} - \tau_{s0} \frac{r^3}{r_1} \right) dr = \\ &= \frac{\pi}{2} r_1^3 \tau_s \left( 1 - \frac{r_0^4}{r_1^4} \right) + 2 \pi r_1^3 \tau_{s0} \left[ \frac{1}{3} \left( 1 - \frac{r_0^3}{r_1^3} \right) - \frac{1}{4} \left( 1 - \frac{r_0^4}{r_1^4} \right) \right]; \end{aligned}$$

$$M_2 = 2 \pi \int_0^{r_2} \left( \tau_{s0} r^2 + \frac{\tau_s}{r_1} r^3 - \frac{\tau_{s0}}{r_1} r^3 \right) dr = \frac{\pi}{2} \tau_s \frac{r_2^4}{r_1} + \pi \tau_{s0} \left( \frac{2}{3} r_2^3 - \frac{1}{2} \frac{r_2^4}{r_1} \right).$$

Отсюда распределение  $\tau_s$  по сечению определяется выражением

$$\tau_s = \frac{\Delta M - 2 \pi r_1^3 \tau_{s0} \left[ \frac{1}{3} \left( 1 - \frac{r_0^3}{r_1^3} \right) - \frac{1}{4} \left( 1 - \frac{r_0^4}{r_1^4} \right) \right] + \pi \tau_{s0} \left( \frac{2}{3} r_2^3 - \frac{1}{2} \frac{r_2^4}{r_1} \right)}{\frac{\pi}{2} r_1^3 \left( 1 - \frac{r_0^4}{r_1^4} \right) - \frac{\pi}{2} \frac{r_2^4}{r_1}}.$$

При определении  $\tau_{s0}$  применяются достаточно малые углы скручивания образцов. Например, при  $l_0 = 12$  мм,  $G = 27000 \dots 28000$  МПа и  $\tau_{s0} = 30 \dots 80$  МПа (вся гамма алюминиевых сплавов в отожженном состоянии) минимальный угол  $\varphi$  при переходе металла в упругопластическое состояние меняется от  $0,5$  до  $0,8^\circ$ . В нагартованном состоянии минимальные углы скручивания увеличиваются пропорционально увеличению исходного сопротивления металлов и сплавов сдвиговой деформации.

#### 8.3.4. Конструкция кондуктора для изготовления образцов новой конфигурации

Изменение конструкции захватов повлекло за собой изменение конфигурации испытуемых образцов. Изготовление образцов с использованием только токарной обработки упрощает процедуру подготовки пластометрических испытаний. Однако применение в захватах стяжных болтов и винтов, проходящих через диаметр захватов и головок образцов, требует высокой точности выполнения диаметральных отверстий в головках. Поэтому с целью упрощения операции сверления спроектирован и изготовлен разборный кондуктор, внешний вид которого показан на рис. 239.



Рис. 239. Внешний вид кондуктора для обработки диаметральных отверстий головок образцов

Конструкция кондуктора демонстрируется разрезом по оси установленного образца на рис. 240. Кронштейн включает ложемент 1 с каналом прямоугольной формы, замкнутый с торцов фланцами 2 и закрываемый сверху крышкой 3, также снабженной прямоугольным

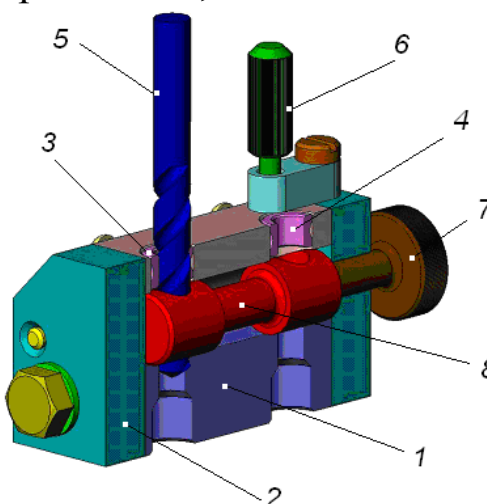


Рис. 240. Продольный разрез кондуктора: 1 – ложемент; 2 – фланец; 3 – крышка; 4 – направляющая втулка; 5 – сверло (развертка); 6 – прижим; 7 – осевой прижим; 8 – образец

каналом. В крышке на заданном расстоянии выполнены две расточки с запрессованными в них закаленными направляющими втулками 4, через которые вводится при обработке сверло 5. На фланцах установлены поворотные резьбовые прижимы 6, закрепляющие крышку на корпусе ложементы. В оном из фланцев установлен винт 7 осевого прижима образца. Образец 8 помещен при обработке в канал ложементы и крышки.

Порядок применения кондуктора при изготовлении образцов показан по шагам на рис. 241.

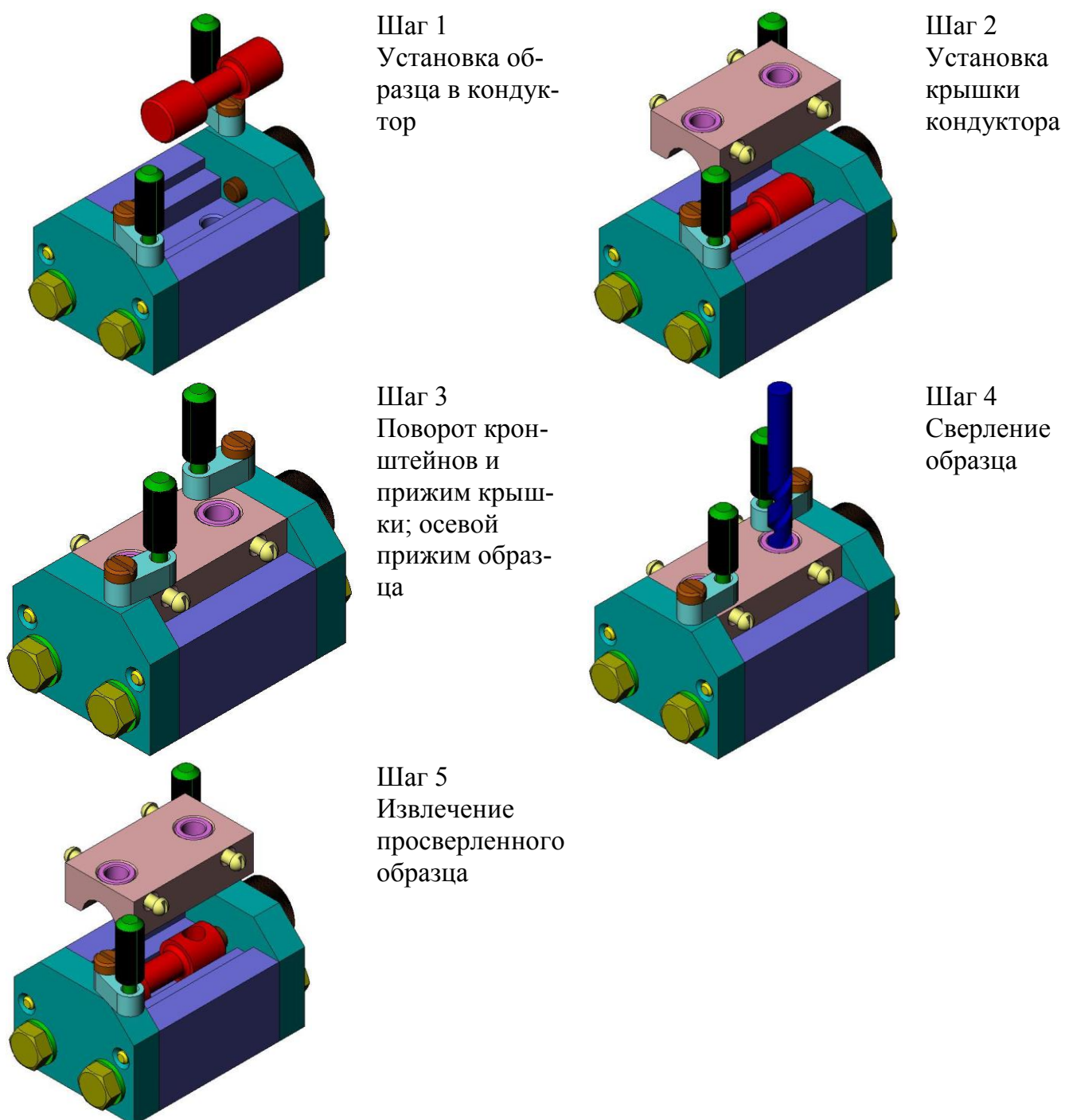


Рис. 241. Порядок работы с кондуктором при изготовлении образцов

Изготовление полых образцов для пластометрических исследований по новой методике может быть выполнено с использованием описанного кондуктора. Для этого во фланце 2 (рис. 240) выполняется отверстие по оси образца, и в него устанавливаются сменные направляющие втулки соответствующего отверстия диаметра. Отверстие может быть выполнено при токарной обработке и использоваться для зацентровки образца при проточке рабочей части и головок.

### **8.3.5. Разработка нового программного обеспечения системы сбора, обработки и хранения информации**

В разд.8.2.5 описан вариант созданного программного обеспечения для стандартного устройства связи ЭВМ с внешними объектами, которое позволяло проводить первичную обработку оцифрованных сигналов, поступающих с установленных на пластометре датчиков.

В связи с корректировкой методики проведения пластометрических исследований на модифицированной установке разработана новая программа обработки опытных данных, в которой были учтены выявленные в процессе эксплуатации предыдущей версии недостатки и неудобства.

Автоматизированная система сбора и первичной обработки информации ротационного пластометра состоит из датчика момента и двух датчиков замера температуры. Упрощенная функциональная схема системы измерения пластометра показана на рис. 242.

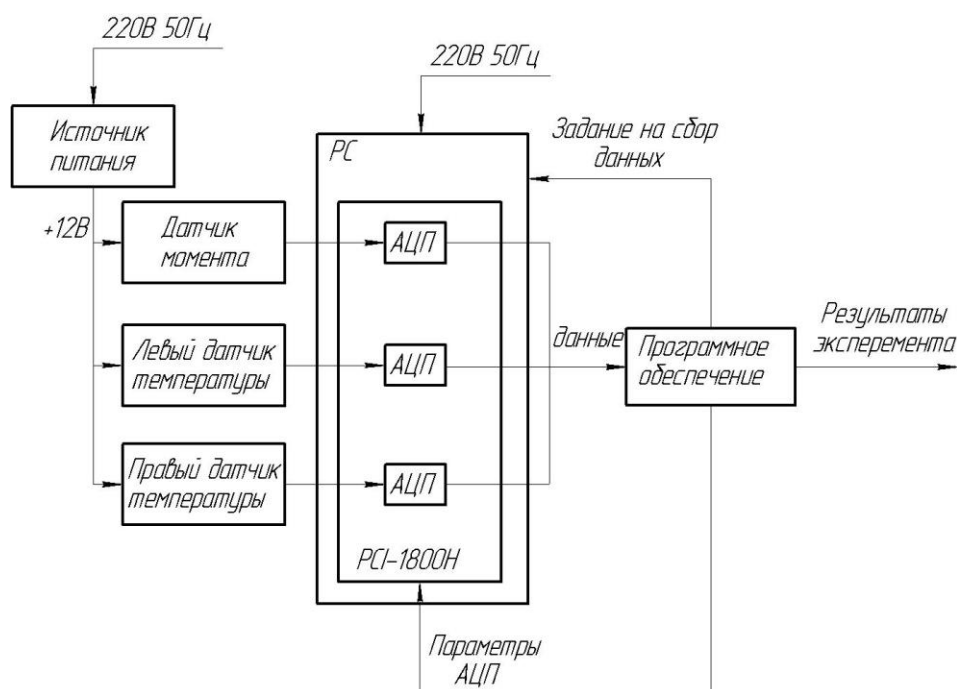


Рис. 242. Функциональная схема системы сбора данных пластометра

Сбор данных осуществлен на базе устройства PCI-1800Н, которое содержит в себе двенадцать однотипных каналов обработки информации с аналоговых датчиков. В системе задействовано три канала. Каждый из каналов содержит усилитель постоянного тока и двенадцатиразрядный аналогово-цифровой преобразователь. Для питания датчиков системы дополнительно формируется напряжение в 12 В.

Физически устройство PCI-1800Н с АЦП реализовано на стандартной РС плате с разъемом PCI. Питание осуществляется от встроенного источника питания РС. Для соединения с внешними аналоговыми датчиками устройство имеет внешнюю дочернюю плату, с которой соединяется при помощи дополнительной шины.

Темп сбора информации с датчиков, параметры АЦП и начальная настройка для проведения эксперимента задаются пользователем при помощи программного обеспечения (задание на сбор данных).

Считывание информации с датчиков системы происходит в двух режимах: режим нагрева и режим деформации. Момент начала режима нагрева совпадает с включением трансформатора, и соответственно момент окончания режима нагрева – с выключением трансформатора. Моменты начала и конца режима нагрева совпадают с включением и выключением двигателя привода станка.

Для управления начальной настройкой, настройкой параметров сбора и первичной обработки данных автоматизированной системы пластометра используется программное обеспечение RotPlastControl. Программное обеспечение RotPlastControl разработано в среде Delphi3.

RotPlastControl состоит из двух окон: главное окно программы (рис. 243) и окно настройки (рис. 244).

Главное окно программы условно разбито на четыре области: область данных нагрева, область задания начальной настройки, область вывода результатов и область управление программой.

Область начальной настройки программы необходима для ввода данных идентификации эксперимента. Все параметры имеют только информационный характер и необходимы для формирования паспорта эксперимента.

При нажатии кнопки [Посмотреть настройку] вызывается окно настройки (см. рис. 244). Заполнение всех полей данного окна является обязательным.

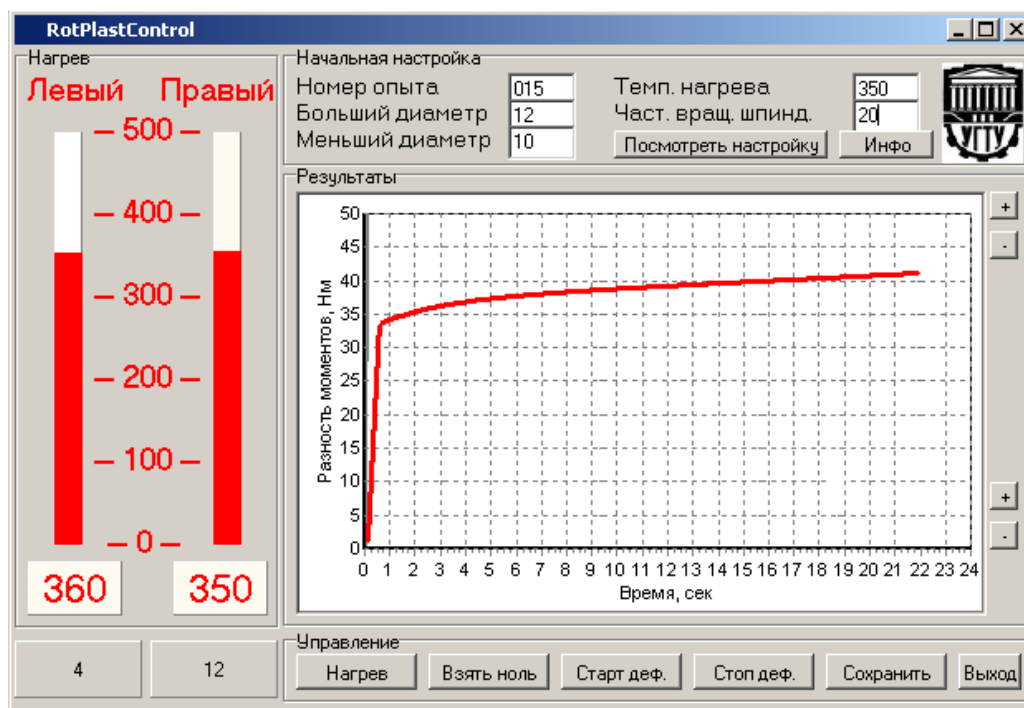


Рис. 243. Главное окно программы сбора данных

Рис. 244. Окно «Настройка»

Описание параметров, входящих в данное окно:

1. Пауза между запросами, мс – этот параметр задает чистоту сбора данных с датчиков системы.
2. Номер канала для датчика момента – параметр указывает порядковый номер канала, к которому подключен датчик момента.
3. Номер канала для левого датчика температуры – параметр указывает порядковый номер канала, к которому подключен датчик температуры, установленный на левом образце.

4. Номер канала для правого датчика температуры – параметр указывает порядковый номер канала, к которому подключен датчик температуры, установленный на правом образце.

5. Область настройки датчиков температуры включает в себя коэффициент линейного температурного расширения материала образцов и коэффициенты тарировочной кривой для каждого датчика.

6. Область настройки параметров датчика момента включает в себя поля для задания коэффициентов тарировочной кривой для датчика.

Запуск режима нагрева осуществляется кнопкой [Нагрев] (см. рис. 243), которая расположена в области [Управление] главного окна программы. При запуске режима нагрева система производит сбор данных с каналов датчиков температуры, обрабатывает их и отображает замеренную температуру образцов. Отображение температуры образцов расположено в области [Нагрев]. Параллельно цифровому отображению температуры образцов также температура отображается графически.

Для начального определения температуры образца предназначена кнопка [Взять ноль] (см. рис. 243), которая расположена в области [Управление] главного окна программы. При нажатии этой кнопки программное обеспечение записывает текущую температуру образца, равную 20<sup>0</sup>С.

Запуск режима деформации осуществляется кнопкой [Нач. деф.] (см. рис. 243), которая расположена в области [Управление] главного окна программы. При запуске режима деформации система производит сбор данных с канала датчика момента.

При возникновении события выключения двигателя привода станка необходимо выйти из режима деформации. Выход из режима деформации осуществляется кнопкой [Стоп. Деф.] (см. рис. 243), которая расположена в области [Управление] главного окна программы.

При выходе из режима деформации программа отображает полученные результаты в области [Результаты] в виде графика Разность моментов, Нм – Время, с.

Для формирования выходного файла отчета об опыте необходимо сохранить результаты. Сохранение текущих результатов осуществляется кнопкой [Сохранить], которая расположена в области управления главного окна программы. Имя файла результатов генерируется автоматически исходя из начальных данных настройки опыта.



Путь к файлу current\_dir/results/, где current\_dir – папка размещения файла программы.

#### **8.4. Перспективный вариант конструктивного исполнения торсионного пластометра**

Созданная торсионная пластометрическая установка может считаться уникальной или, по крайней мере, первой, реализующей дифференциальный метод испытаний на кручение. Установка эффективна при определении сопротивления деформации и предельной пластичности металлов и сплавов как в холодном, так и в горячем состоянии. В первую очередь пластометр должен использоваться для изучения свойств цветных металлов, подвергаемых, в частности, прессованию с высокими степенями деформации. Пластометры любых других конструкций не в состоянии определять величину сопротивления деформации при столь больших вытяжках. Поэтому область больших деформаций до настоящего времени остается неизученной, а поведение металла предсказывается в рамках интуитивно принимаемых гипотез. Стоит отметить, что известные торсионные (ротационные) пластометры, на которых кручению подвергается один образец, а сопротивление сдвиговой деформации определяется, например, по упрощенной формуле Надаи  $\tau_s = \frac{3,2M}{2\pi r^3}$ , где  $M$  – крутящий момент;

$r$  – радиус рабочей части образца, не в состоянии дать достоверную информацию о свойствах металлов при больших углах скручивания, когда не известен характер распределения  $\tau_s$  по сечению образца. Особенно трудно применять традиционную методику испытаний на кручение металлов и сплавов в горячем состоянии. Одновременно протекающие процессы скоростного упрочнения и динамического разупрочнения (возврат и рекристаллизация) при различных скоростях деформации могут приводить как к снижению, так и к увеличению  $\tau_s$ .

Дифференциальный метод может оказаться единственно пригодным для изучения процессов динамического разупрочнения при больших деформациях, когда скорость разупрочнения оказывается существенно различной в сечении образца из-за значительной неоднородности деформации при кручении. Оценивать  $\tau_s$  в циклах нагружения особенно при сравнительно коротких паузах не пред-

ставляется возможным по причине невозможности оценки точности замера максимального тангенциального напряжения.

Без сомнения, созданную пластометрическую установку нельзя считать совершенной и не требующей дальнейшей доработки. Уже в ходе настроечных испытаний проявился недостаток, связанный со значительной инерционностью системы привода и сравнительно малой скоростью срабатывания магнитной фрикционной муфты. Неудовлетворительные динамические параметры привода существенно затрудняют точное задание углов поворота активных захватов. Представляется перспективным вместо электромеханического использовать гидравлический шаговый привод активных захватов дифференциального пластометра. Если маховая масса элементов привода не превосходит номинальную для выбранного привода величину, то пропуск шагов исключается и углы поворота во всем диапазоне скоростей вращения захватов могут задаваться с высокой точностью. Рационально также изменение конфигурации образца. Вместо двух образцов различных диаметров может быть применен один двухступенчатый, через который пропускают электрический ток для нагрева. Концевые головки закрепляются в активные противонаправленно приводимые захваты, а средняя головка защемляется в торсионе измерителя крутящего момента. Ступень образца большего диаметра снабжена осевым отверстием для выравнивания площадей сечения рабочих частей образца и, следовательно, для выравнивания плотностей тока и скоростей нагрева ступеней. При наличии в пластометре шагового привода легко реализуется в автоматическом режиме любая программа деформаций циклического кручения, включающая знакопеременные деформации симметричного и несимметричного циклов.

Вариант конструктивного исполнения торсионного пластометра с гидравлическим шаговым приводом приведен на рис. 245–247 и включает в себя станину 1 с двумя стойками 2, изготовленными из неэлектропроводного материала, шаговый гидромотор 3, помещенный в расточки стоек 2 и кинематически посредством шестерен 4 и 5 связанный с распределительным валом 6, закрепленным в опорах качения в стойках 2. На распределительном валу 6 неподвижно закреплены шестерни 7 и 8, находящиеся в постоянном зубчатом зацеплении с равновеликими по начальному диаметру шестернями 9 и 10 активных захватов 11, изготовленных из высокоэлектропроводного материала и закрепленных с возможностью вращения в стойках 2. В захватах 11 посредством зажимных болтов 12 закреплены концевые го-

ловки двухступенчатого образца 13. Средняя квадратная в сечении головка образца помещена в паз балки 14 измерителя разности крутящих моментов. На плоские полки балки 14, опертые на стойки 15, наклеены тензометрические датчики. Хвостовики валов активных захватов выведены за пределы стоек 2 и взаимодействуют с поворотными контактными колодками 16, в корпуса которых впаяны провода 17 токоподвода. С рычагами колодок 16 кинематически связаны электромагниты 18, снабженные возвратными пружинами. Электромагниты установлены таким образом, что при их подключении к электропитанию сердечники втягиваются в катушки и колодки 16 зажимают концевики валов активных захватов. Для обеспечения противоположенного вращения активных захватов 11 зубчатое зацепление шестерен 8 и 10 осуществлено через паразитную шестерню 19. Шестерни 7 и 8 выполнены композитными с электроизоляционными втулками для предотвращения замыкания активных захватов через распределительный вал 6. В секции образца большего диаметра  $d_1$  выполнено осевое отверстие для выравнивания площадей сечения секций образца.

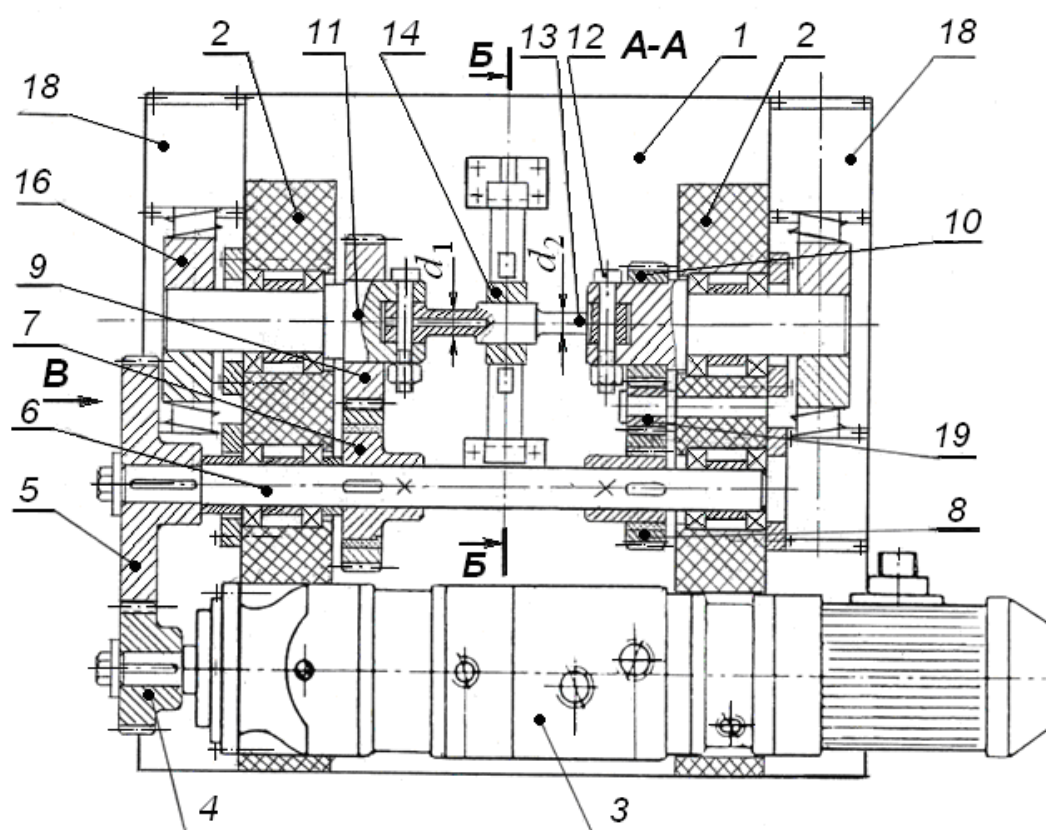


Рис. 245. Торсионный пластометр с шаговым электргидроприводом

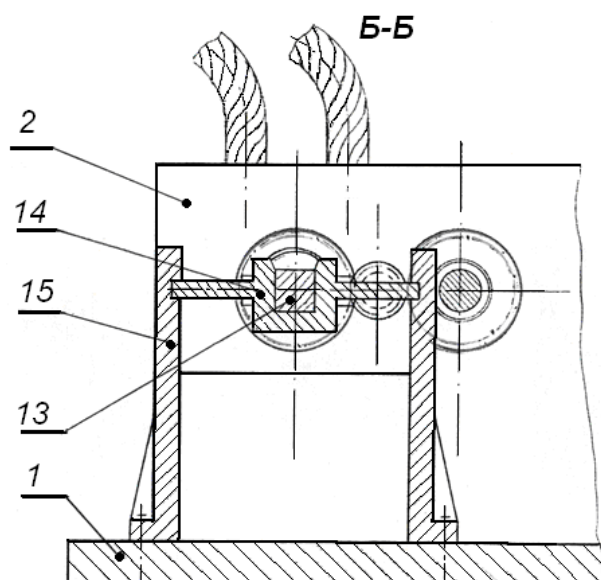


Рис. 246. Поперечный разрез Б-Б пластометра

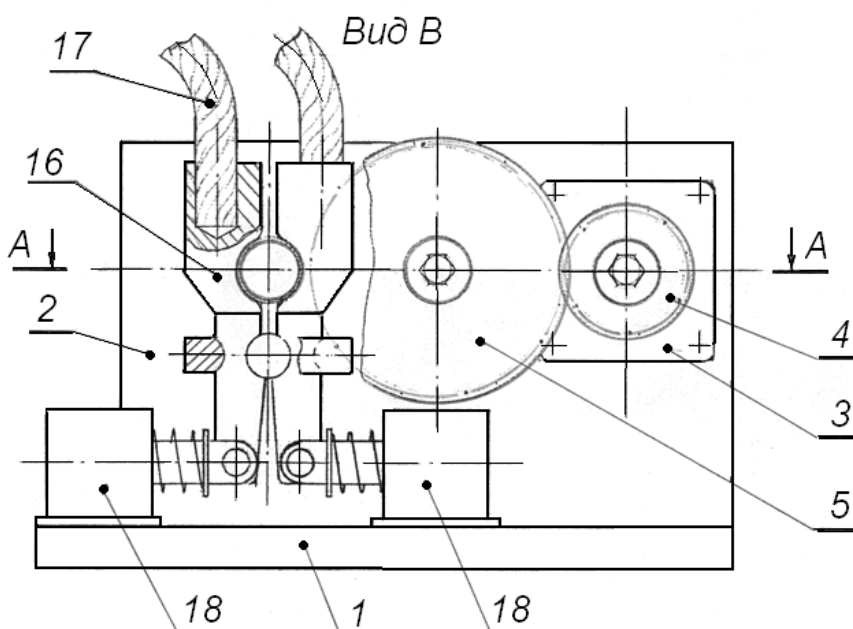


Рис. 247. Вид по стрелке В

В качестве гидравлического шагового привода может использоваться серийный электрогидравлический привод ЭГШП, например типа Э32Г18-24, со следующими характеристиками [57]:

рабочий объем, см <sup>3</sup>	80
максимальная частота импульсов, Гц	4000
максимальная частота вращения, об/мин	1000
максимальный расход масла, л/мин	80
крутящий момент на валу, Н·м	46
мощность максимальная, кВт	4,6
допустимый момент инерции нагрузки, кг·м <sup>2</sup>	0,038

рабочее давление жидкости, номинальное, МПа	6,3
угловая дискрета, град	1,5
статистическая неточность при нагрузке	
0,7 от номинальной	$\pm 1,2^0$
масса, кг	34,3

Пластометр работает следующим образом. После закрепления образца в захватах *11* и настройки системы измерения разности крутящих моментов на контактные колодки *16* подается питание от вторичной обмотки трансформатора. После включения питания электромагнитов *18* колодки прижимаются к хвостовикам валов активных захватов и замыкают вторичную цепь. Контактный нагрев обеих секций образца осуществляется с одинаковой скоростью до заданного уровня, контролируемого пирометром. После достижения заданного нагрева электромагниты *18* отключаются и цепь образца *13* обесточивается. Далее включается шаговый гидропривод *3* на заданное количество тактовых импульсов, подаваемых с заданной частотой. Количество тактовых импульсов определяет угол скручивания, а частота импульсов – скорость поворота активных захватов. Поскольку секции образца скручиваются в противоположных направлениях, балочная мессдоза *14*, в пазу которой закреплена средняя головка образца, воспринимает и замеряет разность крутящих моментов. Замер угла поворота не производится, так как он определен заданием на запуск шагового электрогидравлического привода

$\varphi = \delta N / i$ , град, где  $\delta$  – угловая дискрета шагового привода, град;  $N$  – количество тактовых импульсов в задании;  $i$  – передаточное число зубчатой пары 4-5 (рис. 245).

Скорость деформации при испытании на описываемом пластометре определяется выражением,  $\text{с}^{-1}$ ,

$$\xi = 0,005 \frac{d_{\text{ср}}}{l_0} \cdot \frac{f \delta}{i},$$

где  $f$  – частота тактовых импульсов, Гц.

При максимальной частоте привода типа Э32Г18-24  $f_{\text{max}} = 4$  кГц максимальная скорость деформации составляет  $6,6 \text{ с}^{-1}$  при  $d_{\text{ср}} = 11$  мм,  $l_0 = 25$  мм и  $i = 2$ .

При условии непревышения допустимого момента инерции всех элементов трансмиссии привода вращения головок образцов увеличение скорости деформации возможно за счет уменьшения переда-

точного числа  $i$  и базовой длины образца  $l_0$ . Увеличение  $d_{\text{ср}}$  нецелесообразно, поскольку провоцирует повышение крутящих моментов и мощности. При  $f = 5$  Гц скорость деформации составляет  $0,008 \text{ с}^{-1}$ . Применение меньшей частоты технически не представляет проблем, но нарушает условие непрерывности деформации. Шаговый привод является дискретным, и временной промежуток между тактовыми импульсами при малой скорости вращения может рассматриваться как пауза между циклами деформирования, т.е. в эти промежутки будут развиваться процессы динамического разупрочнения.

При использовании шагового привода пластометра программа испытаний вводится в память системы управления или микроконтроллера. Например, программа может предусматривать произвольное количество симметричных и несимметричных циклов однонаправленного и знакопеременного деформирования. Также просто осуществляется многоцикловое деформирование с подогревом образцов в паузах.

Таким образом, в плане дальнейшего совершенствования техники для пластометрических исследований металлов и сплавов описанная конструкция пластометра и методика испытаний могут рассматриваться как наиболее перспективные и гарантирующие получение надежных опытных данных по свойствам материалов в условиях сложных схем пластической обработки.

## **Заключение**

Разработанная и изготовленная в условиях лаборатории кафедры «Обработка металлов давлением» УГТУ – УПИ пластометрическая установка реализует при испытаниях на кручение образцов из алюминиевых и магниевых сплавов дифференциальный метод, позволяющий с достаточной для производственной практики точностью определять сопротивление металла сдвиговой деформации в условиях как холодной (и теплой), так и горячей обработки. Одновременное кручение двух образцов разного диаметра дает возможность по разности крутящих моментов находить сдвиговые напряжения в достаточно тонком поверхностном слое образца большого диаметра без использования далеко не всегда оправданных гипотез о закономерностях распределения степени упругой и пластической деформаций по всему сечению образца.

Созданная автоматизированная система сбора, обработки и хранения информации предоставляет возможность оперативно обрабатывать большие массивы опытных данных, исключая при построении аппроксимации функций упрочнения человеческий фактор.

В разработке применен хорошо зарекомендовавший себя на практике способ косвенного замера температуры нагрева образцов по величине температурного расширения, т.е. по величине удлинения рабочих частей образцов в процессе нагрева. Это исключает необходимость применения термопар и дорогостоящих пирометров или тепловизоров, а также позволяет достаточно просто формировать сигнал рассогласования при различии в температурах нагрева двух образцов разного поперечного сечения, который эффективно используется в регулировании сопротивления шунтирующей цепи образца меньшего диаметра.

Примененный электроконтактный нагрев испытываемых образцов сокращает время проведения испытаний и предоставляет возможность в широком диапазоне регулировать скорость нагрева образцов.

Созданный ротационный пластометр пригоден для циклических испытаний при изучении динамического разупрочнения металлов и сплавов в условиях горячего деформирования. На нем легко осуществимо знакопеременное кручение, позволяющее выявить склонности металла к проявлению эффекта Баушингера, что чрезвычайно важно при постановке задач теоретического анализа процессов пластической обработки со сложными схемой и историей деформирования. Подобная информация практически полностью отсутствует в современной технической литературе, что не дает возможность анализировать, например, сложные процессы штамповки даже при использовании современных и достаточно совершенных пакетов прикладных программ.

Созданная конструкция ротационного пластометра проста, удобна в обслуживании, использует периферийное серийное оборудование для привода и нагрева и легко адаптируется к условиям заводских и цеховых лабораторий.

## Библиографический список

1. Колбасников Н.Г. Теория обработки металлов давлением. Сопротивление деформации и пластичность /Н.Г. Колбасников. СПб.: СПбГТУ, 2000. – 314 с.
2. Жуковец И.И. Механические испытания металлов /И.И. Жуковец. М.: Высшая школа, 1986. – 199 с.
3. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением /В.Л. Колмогоров. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2001. – 836 с.
4. Гольденблат И.И. Критерии прочности и пластичности конструкционных материалов /И.И. Гольденблат, В.А. Копнов. М.: Машиностроение, 1968. – 192 с.
5. Вопросы теории пластичности: сборник статей /под ред. А.А. Илюшина. М.: Академия наук СССР, 1961. – 92 с.
6. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести /Н.Н. Малинин. М.: Машиностроение, 1968. – 400 с.
7. Ренне И.П. Об оценке анизотропии механических свойств листовых материалов /И.П. Ренне, В.В. Шевелев, С.П. Яковлев //Технология машиностроения. Вып.1. Исследования в области пластических деформаций и обработки металлов давлением. Тула: Приокское книжное издательство, 1967. С. 100-108.
8. Микляев П.Г. Анизотропия механических свойств металлов /П.Г. Микляев, Я.Б. Фридман. М.: Металлургия, 1986. – 224 с.
9. Добаткин В.И. Алюминиевые сплавы. Структура и свойства полуфабрикатов из алюминиевых сплавов: справочник /В.И. Добаткин, М.Г. Микляев, В.С. Синявский. М.: Металлургия, 1984. – 272 с.
10. Полухин П.И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов /П.И. Полухин, Г.Я. Гун, А.М.Галкин. М.: Металлургия, 1983. – 352 с.
11. Кроха В.А. Кривые упрочнения металлов при холодной деформации /В.А. Кроха. М.: Машиностроение, 1968. – 131 с.
12. Хензель А. Расчет энергосиловых параметров в процессах обработки металлов давлением: справочник /А. Хензель, Т. Шпиттель. М.: Металлургия, 1982. – 360 с.
13. Микляев П.Г. Механические свойства легких сплавов при температурах и скоростях обработки давлением: справочник /П.Г. Микляев. М.: Металлургия, 1994. – 288 с.



14. Пластометрические исследования металлов /Н.А. Мочалов, А.М. Галкин, С.Н. Мочалов, Д.Ю. Парфенов. М.: Интернет Инжиниринг, 2003. – 318 с.
15. Полухин П.И. Физические основы пластической деформации /П.И. Полухин, С.С. Горелик, В.К. Воронцов. М.: Металлургия, 1982. – 584 с.
16. Соколов Л.Д. Сопротивление металлов пластической деформации /Л.Д. Соколов. М.: Металлургиздат, 1963. – 284 с.
17. Полухин П.И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов: справочник /П.И. Полухин, Г.Я. Гун, А.М. Галкин. М.: Металлургия, 1976. – 488 с.
18. Матюнин В.М. Оперативная диагностика механических свойств конструкционных материалов /В.М. Матюнин М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 216 с.
19. Норицын И.А. Определение механических характеристик сталей при испытаниях на кручение /И.А. Норицын, П.Е. Кислый //Заводская лаборатория. – 1960. – №8. – С. 999-1006.
20. Суяров Д.И. Определение сопротивления деформации металлов /Д.И. Суяров, М.А. Беняковский, Н.П. Скрыбин //Заводская лаборатория. – 1955. – №1. – С. 97-99.
21. Лихарев К.К. К практике построения диаграмм истинных напряжений /К.К. Лихарев //Заводская лаборатория. – 1949. – №11. – С. 1343-1347.
22. Шофман Л.А. Экспериментальные исследования холодной и горячей осадки /Л.А. Шофман. М.: Машгиз, 1950. – С. 39-110.
23. Третьяков А.В. Эмпирические формулы для определения механических свойств металлов при холодной прокатке /А.В. Третьяков, Э.Г. Альбрехт //Прокатное производство. Вып. II. Свердловск: Металлургиздат, 1960. – С. 21-24.
24. Ефимов В.Н. Сопротивление деформации в процессах прокатки /В.Н. Ефимов, М.Я. Бровман. М.: Металлургия, 1996. – 254 с.
25. Зюзин В.И. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением /В.И. Зюзин, А.В. Третьяков. Челябинск: Металл, 1993. – 368 с.
26. Агеев Н.П. Механические испытания металлов при высоких температурах и кратковременном нагружении /Н.П. Агеев, С.И. Каратушин. М.: Металлургия, 1968. – 280 с.

27. Гун Г.Я. Прессование алюминиевых сплавов. Математическое моделирование и оптимизация /Г.Я. Гун, В.И. Яковлев, Б.А. Прудковский. М.: Metallurgy, 1974. – 336 с.
28. Кулачковый пластометр кафедры обработки металлов давлением УПИ /В.А. Чичигин, Б.М. Антошечкин, В.Г. Бурдуковский, С.П. Буркин //Обработка металлов давлением. Вып.6. Свердловск: УПИ, 1979. – С. 143-147.
29. Картак Б.Р. Об условиях постоянства скорости деформации при испытании механических свойств металлов на пластометре /Б.Р. Картак, С.П. Буркин, Э.В. Вашляев //Физика и механика обработки металлов давлением. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1975. – С. 69-73.
30. Установка для пластометрических испытаний /С.П. Буркин, Р.Ф. Исхаков, А.В. Разинкин, Е.А. Андрюкова //Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2005. Т. 71,– №11. – С. 45-50.
31. Автоматизация экспериментального определения сопротивления металла горячей деформации /С.П. Буркин, Р.Ф. Исхаков, А.В. Разинкин, С.И. Паршаков //Известия вузов. Черная металлургия, 2006. – №1. – С. 35-39.
32. Мигачев Б.А. Сопротивление деформации в механике обработки давлением /Б.А. Мигачев. Екатеринбург: УрО РАН, 1997. – 176 с.
33. Бабичев А.П. Физические величины: справочник /А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, Н.А. Братковский. М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
34. Колачев Б.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов /Б.А. Колачев, В.И. Елагин, В.А. Ливанов. М.: МИСИС, 2001. – 416 с.
35. Смирягин А.П. Промышленные цветные металлы и сплавы /А.П. Смирягин, Н.А. Смирягина, А.В. Белова. М.: Metallurgy, 1974. – 488 с.
36. Белов А.Ф. Строение и свойства авиационных материалов /А.Ф. Белов, Г.П. Бенедиктова, А.С. Висков. М.: Metallurgy, 1989. – 368 с.
37. Хвойка И. Цветные металлы и их сплавы /И. Хвойка. М.: Metallurgy, 1973. – 240 с.
38. Ерманок М.З. Прессование профилей из алюминиевых сплавов /М.З. Ерманок, В.И. Фейгин, Н.А. Сухоруков. М.: Metallurgy, 1977. – 264 с.

39. Корнеев Н.И. Ковка и штамповка цветных металлов: справочник /Н.И. Корнеев, В.М. Аржаков, Б.Г. Бармашенко. М.: Машиностроение, 1971. – 232 с.
40. Целиков А.И. Теория расчета усилий в прокатных станах /А.И. Целиков. М.: Metallurgy, 1963. – 284 с.
41. Целиков А.И. Теория прокатки: справочник /А.И.Целиков [и др.] М.: Metallurgy, 1982. – 335 с.
42. Микляев П.Г. Сопротивление деформации и пластичность алюминиевых сплавов: справочник /П.Г. Микляев, В.М. Дуденков. М.: Metallurgy, 1979. – 183 с.
43. Жолобов В.В. Прессование металлов /В.В. Жолобов, Г.И. Зверев. М.: Metallurgy, 1971. – 456 с.
44. Третьяков А.В. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением /А.В. Третьяков, Г.К. Трофимов, В.И. Зюзин. М.: Metallurgy, 1964. – 224 с.
45. Арзамасов Б.Н. Справочник по конструкционным материалам: справочник /Б.Н. Арзамасов [и др.] М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2005. – 640 с.
46. Алюминиевые сплавы. Структура и свойства полуфабрикатов из алюминиевых сплавов: справочник /под ред. В.И. Добаткина. М.: Metallurgy, 1974. – 432 с.
47. Ерманок М.З. Производство профилей из алюминиевых сплавов /М.З. Ерманок, В.И. Фейгин. М.: Metallurgy, 1972. – 272 с.
48. Герчикова Н.С. Тонкая структура и коррозионное растрескивание алюминиевых сплавов /Н.С. Герчикова. М.: Metallurgy, 1982. – 163 с.
49. Полухин П.И. Исследование сопротивления деформации группы алюминиевых и титановых сплавов на кулачковых пластометрах /П.И. Полухин, А.М. Галкин //Обработка металлов давлением и сплавов. М.: ВИЛС, 1971. – С.49-55.
50. Эмли Е.Ф. Основы технологии производства и обработки магниевых сплавов /Е.Ф. Эмли. М.: Metallurgy, 1972. – 488 с.
51. Щерба В.Н. Прессование алюминиевых сплавов /В.Н. Щерба. М.: Интернет Инжиниринг, 2001. – 768 с.
52. Коврев Г.С. Электроконтактный нагрев при обработке цветных металлов /Г.С. Коврев. М.: Metallurgy, 1975. – 321 с.
53. Романов Д.И. Электроконтактный нагрев металлов /Д.И. Романов. М.: Машиностроение, 1981. – 168 с.

54. Алиферов А. Электроконтактный нагрев металлов /А. Алиферов, С. Луи. Новосибирск: НГТУ, 2004. – 224 с.
55. Скорняков В.Б. Элементы систем автоматического регулирования /В.Б. Скорняков. Свердловск: УПИ им. С.М.Кирова, 1973. – 120 с.
56. Биргер И.А. Расчет на прочность деталей машин /И.А. Биргер, Б.Ф.Шорр, Р.М.Шнейдерович. М.: Машиностроение, 1966. – 616 с.
57. Свешников В.К. Станочные гидроприводы: справочник /В.К. Свешников. М.: Машиностроение, 1995. – 448 с.

# ПРИЛОЖЕНИЕ

Химический состав деформируемых алюминиевых и магниевых сплавов по ГОСТ 8617, ГОСТ 14957, ASTM B211 и DIN EN755-2-0,8.1997 (массовая доля элементов, %)

Таблица П1

## Система Al

Сплавы	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ti	Прочие	Примеси
<b>ГОСТ</b>									
АД04	0,003	-	-	0,005	0,005	0,003	-	-	0,02
АД4	0,015	-	-	0,03	0,03	0,005	0,002	-	0,05
АД000	0,02	0,02	0,02	0,15	0,15	0,05	0,03	Ga 0,005	0,2
АД00(1010)	0,015	0,02	0,02	0,16	0,16	0,07	0,05	Ga 0,03	0,3
АД0(1011)	0,02	0,03	0,025	0,30	0,30	0,07	0,05	-	0,5
АД1(1030)	0,05	0,05	0,05	0,30	0,30	0,10	0,15	-	0,7
АДС	0,10	-	-	0,60	0,50	0,10	0,15	-	1,0
АД(1015)	0,10	0,10	0,10	0,50	0,50	0,10	0,15	-	1,2
<b>ASTM</b>									
AA1199	0,006	0,006	0,002	0,006	0,006	0,006	0,002	Ga 0,005	0,01
AA1095	0,01	0,01	0,01	0,03	0,03	0,01	0,005	-	0,05
AA1080	0,03	-	-	0,15	0,15	0,03	0,03	-	0,20
AA1090	0,02	0,01	0,01	0,07	0,07	0,03	0,01	V 0,055	0,10
AA1085	0,03	0,02	0,02	0,01	0,12	0,03	0,02	-	0,15
AA1188	0,005	0,01	0,01	0,06	0,06	0,03	0,01	-	0,12
AA1285	0,02	0,01	0,01	0,08	0,08	0,03	0,02	Ga 0,03	0,15
AA1185	0,01	0,02	0,02	0,08	0,15	0,03	0,02	V 0,05	0,15
AA1180	0,01	0,02	0,02	0,09	0,09	0,03	0,02	-	0,20
AA1170	0,30	0,02	0,03	0,16	0,30	0,04	0,03	V 0,05	0,30
AA1175	0,10	0,02	0,02	0,18	0,15	0,04	0,02	-	0,35
AA1070	0,04	0,03	0,03	0,25	0,20	0,04	0,03	-	0,30
AA1075	0,04	0,03	0,03	0,30	0,20	0,04	0,03	-	0,35
AA1050	0,05	0,05	0,05	0,04	0,35	0,05	0,03	V 0,05	0,50
AA1060	0,05	0,03	0,03	0,35	0,25	0,05	0,03	V 0,05	0,40
AA1250	0,10	0,01	0,01	0,40	0,25	0,05	-	V+Ti0,01	0,50
AA1350	0,05	-	0,01	0,40	0,20	0,05	0,02	B 0,05; Ga 0,03	0,50
AA1230	0,10	0,05	0,04	0,30	0,70	0,10	0,03	V 0,05	0,07
AA1135	до0,2	0,05	0,05	0,30	0,60	0,10	0,03	V 0,05	0,65
AA1235	0,05	0,02	0,05	0,30	0,65	0,10	0,06	V 0,05	0,65
AA1435	0,02	0,05	0,05	0,3- 0,5	0,15	0,10	0,03	V 0,05	0,65
AA1145	0,05	0,10	0,05	0,5	0,55	0,05	0,03	V 0,05	0,55
AA1345	0,10	0,10	0,05	0,40	0,30	0,05	0,03	V 0,05	0,55

Окончание табл.П1

Сплавы	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ti	Прочие	Примеси
AA1030	0,10	0,10	0,05	0,60	0,35	0,10	0,03	V 0,05	0,70
AA1040	0,10	0,10	0,05	0,60	0,30	0,10	0,03	V 0,05	0,60
AA1100	до0,2	-	0,05	0,95	-	0,10	0,15	-	1,0
AA1200	0,05	-	0,05	1,0	-	0,10	0,05	-	1,0
<b>DIN</b>									
A199.99	0,006	0,006	0,002	0,006	0,06	0,006	0,002	V 0,055	0,02
A199.90	0,02	0,01	0,01	0,07	0,07	0,03	0,001	-	0,03
A199.85	0,03	0,02	0,02	0,12	0,10	0,03	0,02	-	0,10
A199.7	0,03	0,03	0,03	0,35	0,30	0,07	0,03		0,30
A199.6	0,05	0,03	0,03	0,35	0,25	0,05	0,03	B 0,05	0,40
A199.5	0,05	-	0,01	0,40	0,10	0,05	-	V+Ti0,02 Cr 0,01	0,50
A199	0,05	-	0,05	Fe+Si	1,0	0,10	0,06	-	1,0

Таблица П2

Система *Al-Mn*

Сплавы	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ti	Прочие	Приме- -си
<b>ГОСТ</b>									
ММ(1511)	0,20	0,2-0,5	1,0-1,4	0,60	1,0	0,10	0,10	-	0,20
АМц(1400)	0,10	0,20	1,0-1,4	0,70	0,60	0,10	0,20	-	0,10
АМцС(1401)	0,10	0,05	1,0-1,4	до 0,45	до 0,35	0,10	0,10	-	0,10
<b>ASTM</b>									
AA3005	0,30	0,2-0,6	1,0-1,5	0,70	0,60	0,25	0,10	Cr 0,10	0,15
AA3105	0,30	0,2-0,8	0,3-0,8	0,70	0,60	0,40	0,10	Cr 0,20	0,15
AA3006	0,1- 0,3	0,3-0,6	0,5-0,8	0,70	0,50	0,15- 0,4	0,10	Cr 0,20	0,15
AA3007	до 0,3	0,6	0,3-0,4	0,7	0,5	0,4	0,1	Cr 0,20	0,15
AA3015	0,3	0,2-0,7	0,5-0,9	0,80	0,60	0,25	0,10	-	0,15
AA3016	0,3	0,5-0,8	0,5-0,9	0,80	0,60	0,25	0,10	-	0,15
AA3003	до 0,2	-	1,0-1,5	0,7	0,6	0,1	-	-	0,15
AA3107	до 0,15	-	0,4-0,9	0,7	0,6	0,1	-	-	0,15
AA3307	0,3	0,3	0,5-0,9	0,80	0,60	0,25	0,10	-	0,15
AA3009	0,1	0,1	1,2-1,8	0,70	1,0- 1,8	0,05	0,10	-	0,15
AA3010	0,03	-	до 0,9	0,2	0,10	0,05	0,05	Cr0,05; Ni 0,05	0,15

## Окончание табл. П2

Сплавы	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ti	Прочие	Приме- -си
AA3011	до 0,2	-	0,8-1,2	0,7	0,4	0,1	0,1	Cr 0,40	0,15
<b>DIN</b>									
AlMn1Mg0,5	0,03	0,2-0,6	1,0-1,5	0,70	0,60	0,25	0,10	Cr 0,10	0,15
AlMn0,5Mg0,5	0,3	0,2-0,8	0,3-0,8	0,70	0,60	0,40	0,10	Cr 0,20	0,15
AlMn1Cu	до 0,2	-	1,0-1,5	0,60	0,70	0,10	-	Zr 0,1- 0,3	0,15

## Таблица П3

Система *Al-Mg-Mn*

Сплавы	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ti	Прочие	При- -меси
<b>ГОСТ</b>									
Д12(1521)	0,10	0,8-1,3	1,0-1,5	0,70	0,70	0,10	0,10	-	0,10
АМг1(1510)	0,10	0,7-1,6	0,2	0,1	-	-	-	-	0,10
АМг2(1520)	0,10	1,8-2,6	0,2-0,6	0,4	0,4	0,2	0,1	Cr 0,05	0,10
АМг3(1530)	0,10	3,2-3,8	0,3-0,6	0,5	0,1-0,8	0,2	0,1	Cr 0,05	0,10
АМг4(1540)	0,10	3,8-4,5	0,5-0,8	0,4	0,4	0,2	до 0,1	Cr до 0,25	0,10
АМг4(1541)	0,05	3,8-4,8	0,2-0,5	0,1- 0,3	0,2	-	до 0,1	Be до 0,005	0,10
АМг4(1541пч)	0,02	3,5-4,5	0,02	0,07	0,07	0,02	до 0,06	-	0,10
АМг4(1543)	0,10	3,8-5,0	0,2-0,5	0,5	0,5	0,1	до 0,1	Be 0,005	0,10
АМг5(1550)	0,10	4,8-5,8	0,3-0,8	0,5	0,5	0,2	0,1	Be 0,005	0,10
АМг6(1560)	0,10	5,8-6,9	0,5-0,8	0,4	0,4	0,2	0,1	Be 0,005	0,10
АМ61(1561)	0,10	5,5-6,5	0,7-1,1	0,4	0,4	0,2- 1,0	-	Be 0,003 Zr до 0,12	0,10
<b>ASTM</b>									
AA3004	0,25	0,8-1,3	0,8-1,3	0,7	0,3	0,25	-	-	0,15
AA3104	до 0,25	0,8-1,3	0,8-1,4	0,8	0,6	0,25	0,1	V и Ga 0,05	0,15
AA5005	0,2	0,5-1,1	0,2	0,7	0,3	0,25	-	Cr 0,1	0,15
AA5205	0,1	0,6-1,0	0,1	0,7	0,15	0,05	-	Cr 0,1	0,15
AA5006	0,1	0,8-1,3	0,4-0,8	0,8	0,4	0,25	0,1	Cr 0,1	0,15
AA5016	0,2	1,4-1,9	0,4-0,7	0,6	0,25	0,15	0,05	-	0,15
AA5040	0,25	1,0-1,5	0,9-1,4	0,7	0,3	0,25	-	Cr 0,1-0,3	0,15
AA5043	0,35	0,7-1,3	0,7-1,2	0,7	0,4	0,25	0,1	V и Cr 0,05	0,15
AA5050	0,2	1,1-1,8	0,1	0,7	0,4	0,25	-	Cr 0,1; Ga 0,05	0,15

Продолжение табл. ПЗ

Сплавы	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ti	Прочие	При- меси
AA5250	0,1	1,3-1,8	0,1-0,15	0,10	0,08	0,05	-	V 0,05	0,10
AA5052	0,1	2,2-2,8	0,1	0,4	0,25	0,10	-	Cr 0,15- 0,35	0,15
AA5252	0,1	2,2-2,8	0,1	0,1	0,08	0,05	-	V 0,05	0,10
AA5352	0,1	2,2-2,7	0,1	Fe+ Si	0,45	0,1	0,1	Cr 0,10	0,15
AA5552	0,1	2,2-2,8	0,1	0,05	0,04	0,05	-	V 0,5	0,10
AA5652	0,04	2,2-2,8	0,01	Fe+ Si	0,40	0,10	-	Cr 0,15- 0,35	0,15
AA5051	0,25	1,7-2,2	0,20	0,70	0,40	0,25	0,10	Cr 0,10	0,15
AA5151	0,15	1,5-2,1	0,10	0,35	0,20	0,15	0,10	Cr 0,10	0,15
AA5535	0,10	1,6-2,2	0,10	0,10	0,08	0,05	-	V 0,05	0,10
AA5454	0,10	2,4-3,0	0,5-1,0	0,40	0,25	0,25	0,20	-	0,15
AA5154	0,10	3,1-3,9	0,10	0,40	0,25	0,20	0,20	Cr 0,15- 0,35	0,15
AA5254	0,05	3,1-3,9	0,01	Fe+ Si	0,45	0,20	до 0,15	Cr 0,15- 0,35	0,15
AA5654	0,05	3,1-3,9	0,01	Fe+ Si	0,45	0,20	до 0,15	Cr 0,15- 0,35	0,15
AA5086	0,10	3,5-4,3	0,2-0,7	0,50	0,40	0,25	0,15	Cr 0,15- 0,25	0,15
AA5082	0,15	4,0-5,0	0,15	0,35	0,20	0,25	0,10	Cr 0,15	0,15
AA5182	0,15	4,0-5,0	0,2-0,5	0,35	0,20	0,25	0,10	Cr 0,10	0,15
AA5083	0,10	4,0-4,9	0,4-1,0	0,40	0,40	0,25	0,15	Cr 0,05- 0,25	0,15
AA5056	0,10	4,5-5,6	до 0,2	0,40	0,30	0,10	-	Cr 0,05- 0,20	0,15
AA5356	0,10	4,5-5,5	до 0,2	0,40	0,25	0,10	до 0,7	Cr 0,05- 0,20	0,15
AA5456	0,10	4,7-5,5	0,5-1,0	0,40	0,25	0,25	0,2	Cr 0,05- 0,20	0,15
AA5556	0,10	4,7-5,5	0,5-1,0	0,40	0,25	0,25	до 0,7	Cr 0,05- 0,20	0,15
<b>DIN</b>									
AlMg1Mn1	0,25	0,8-1,3	1,0-1,5	0,70	0,30	0,25	-	V, Ga 0,05	0,15
AlMg1Mn1Cu	до 0,25	0,8-1,3	0,8-1,4	0,8	0,6	0,25	0,10	-	0,15
AlMg1(B)	0,20	0,5-1,1	0,2	0,7	0,3	0,23	-	Cr 0,1; Ga0,05	0,15
AlMg1,5(C)	0,2	1,1-1,8	0,1	0,7	0,4	0,25	-	Cr 0,10	0,15
AlMg1,5Mn	0,25	1,0-1,5	0,9-1,4	0,7	0,3	0,25	-	Cr 0,1-0,3	0,15
AlMg3Mn	0,1	2,4-3,0	0,5-1,0	0,4	0,25	0,25	0,20	Cr 0,05-0,2	0,15



## Окончание табл. ПЗ

Сплавы	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ti	Прочие	При- меси
AlMg2,5(A)	0,1	2,2-2,8	0,10	Fe+ Si	0,4	0,10	0,10	Cr0,1	0,15
AlMg2,5(B)	0,10	2,2-2,8	0,10	0,10	0,08	0,05	-	-	0,10
AlMg2,5	0,10	2,2-2,8	0,10	0,40	0,25	0,10	-	Cr 0,15- 0,35	0,15
AlMg3,5Cr	0,05	3,1-3,9	0,01	Fe+ Si	0,40	0,20	до 0,15	Cr 0,15- 0,35	0,15
AlMg4,5Mn0,4	0,15	4,0-5,0	0,2-0,5	0,35	0,20	0,25	0,1	Cr 0,1	0,15
AlMg4,5Mn0,7	0,1	4,0-4,9	0,4-1,0	0,4	0,4	0,25	0,15	Cr 0,05- 0,25	0,15
AlMg5	0,1	4,5-5,6	0,1-0,6	0,5	0,4	0,2	0,1	Cr 0,2	0,15

## Таблица П4

Система *Al-Mg-Si*

Сплавы	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ti	Прочие	При- меси
<b>ГОСТ</b> АД31(1310)	0,10	0,4-0,9	0,10	0,50	0,3-0,7	0,20	0,15	-	0,10
АД31Е(1310Е)	0,10	0,45-0,9	0,03	0,1- 0,6	0,45-0,9	0,10	0,03	Cr 0,03; (Ti+Mn+W +Cr) 0,03	0,10
1320	до 0,15	0,45- 0,75	до 0,15	0,15	0,4-0,65	0,05	до 0,05	Cr 0,03; Ni 0,03	0,10
АД33(1330)	0,15 -0,4	0,8-1,2	0,15	0,70	0,4-0,8	0,25	0,15	Cr 0,15- 0,35	0,15
АД35(1350)	0,10	0,8-1,4	0,5-0,9	0,50	0,8-1,2	0,20	0,15	-	0,10
АВ(1341)	0,1- 0,5	0,45-0,9	0,15- 0,35	0,50	0,3-1,2	0,20	0,15	Cr 0,25	0,10
АВч(1341ч)	0,05	0,6-1,0	0,05	0,12	0,35- 0,55	0,05	-	-	0,10
АВп(1341п)	0,10	0,4-0,9	0,20	0,30	0,4-0,75	0,20	0,15	-	0,10
<b>ASTM</b> AA6063	0,10	0,45-0,9	0,10	0,35	0,2-0,6	0,10	0,10	Cr 0,10	0,15
AA6463	0,20	0,45-0,9	0,05	0,15	0,2-0,6	0,05	-	V 0,05	0,15
AA6763	до 0,16	0,45-0,9	0,03	0,08	0,2-0,6	0,03	-	-	0,10
AA6101	0,10	0,35-0,8	0,03	0,50	0,3-0,7	0,10	-	B 0,06	0,10
AA6201	0,10	0,6-0,9	0,03	0,50	0,5-0,9	0,10	-	Cr 0,03	0,10
AA6301	0,10	0,6-0,9	0,15	0,70	0,5-0,9	0,25	0,15	B 0,06; Cr 0,1	0,15
AA6005	0,10	0,4-0,6	0,10	0,35	0,6-0,9	0,10	0,10	Cr 0,1; Cr 0,25	0,15
AA6005A	0,30	0,4-0,7	0,5	0,35	0,5-0,9	0,2	0,1	Cr 0,3	0,15

Продолжение табл. П4

Сплавы	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ti	Прочие	При- меси
AA6105	0,10	0,45-0,8	0,1	0,35	0,6-1,0	0,1	0,1	Cr 0,1	0,15
AA6017	до 0,2	0,45-0,6	0,1	0,15 -0,3	0,55-0,7	0,05	0,05	Cr 0,1	0,15
AA6060	0,1	0,35-0,6	0,1	0,1- 0,3	0,3-0,6	0,15	0,10	Cr 0,05	0,15
AA6162	0,2	0,7-1,1	0,1	0,5	0,4-0,8	0,25	0,10	Cr 0,1	0,15
AA6061	0,15 -0,4	0,8-1,2	0,15	0,7	0,4-0,8	0,25	0,15	Cr 0,04- 0,35	0,15
AA6262	0,15 -0,4	0,8-1,2	0,15	0,7	0,4-0,8	0,25	0,15	Cr 0,04- 0,14	0,15
AA6205	0,2	0,4-0,6	0,05- 0,15	0,7	0,6-0,9	0,25	0,15	Cr 0,15; Zr 0,15	0,15
AA6351	0,1	0,4-0,8	0,4-0,8	0,5	0,7-1,3	0,2	0,2	-	0,15
AA6007	0,2	0,6-0,9	0,05- 0,25	0,7	0,9-1,4	0,25	0,15	Cr 0,85; Zr 0,2	0,15
AA6003	0,1	0,8-1,5	0,8	0,6	0,35-1,0	0,2	0,1	Cr 0,35	0,15
AA6151	0,35	0,45-0,8	0,2	1,0	0,6-1,2	0,25	0,15	Cr 0,15- 0,35	0,15
AA6009	0,15 -0,6	0,4-0,8	0,2-0,8	0,5	0,6-1,0	0,25	-	Cr 0,10	0,15
AA6010	0,15 -0,6	0,6-1,0	0,2-0,8	0,5	0,8-1,2	0,25	0,10	Cr 0,10	0,15
AA6110	0,2- 0,7	0,5-1,1	0,2-0,7	0,8	0,7-1,5	0,3	0,15	Cr 0,04- 0,25	0,15
AA6011	0,4- 0,9	0,6-1,2	0,8	1,0	0,6-1,2	1,5	0,2	Cr 0,3	0,15
AA6111	0,5- 0,9	0,5-1,0	0,15- 0,45	0,4	0,7-1,1	0,15	0,1	Cr 0,1	0,15
AA6013	0,6- 1,1	0,8-1,2	0,2-0,8	0,5	0,6-1,0	0,25	0,1	Cr 0,1	0,15
AA6070	0,15 -0,4	0,5-1,2	0,4-1,0	0,5	1,0-1,7	0,25	0,15	Cr 0,1	0,15
<b>DIN</b>									
AlMg0,75Si	0,1	0,45-0,9	0,1	0,35	0,2-0,6	0,1	0,1	Cr 0,1	0,15
AlSiMg(A)	0,3	0,4-0,7	0,5	0,35	0,5-0,9	0,2	0,1	Cr 0,3	0,15
AlMgSi0,5	0,1	0,35-0,8	0,1	0,1- 0,3	0,3-0,6	0,15	0,1	Cr 0,05; B 0,06	0,15
AlMgSi0,6	0,1	0,35-0,8	0,03	0,5	0,3-0,7	0,10	0,1	Cr 0,03	0,15
AlMgSi0,8	0,1	0,4-0,6	0,1	0,35	0,6-0,9	0,10	0,1	Cr 0,10	0,15

Окончание табл. П4

Сплавы	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ti	Прочие	При- меси
AlMgSiPb	0,15 -0,4	0,18-1,2	0,15	0,7	0,4-0,8	0,25	0,15	Cr 0,04- 0,14; Bi, Pb 0,4-0,7	0,15
AlMg1SiCu	0,15 -0,4	0,8-1,2	0,15	0,7	0,4-0,8	0,25	0,15	Cr 0,04- 0,35	0,15
AlMg1Si0,8	0,1	0,8-1,5	0,8	0,6	0,35-1,0	0,20	0,10	Cr 0,35	0,15
AlMgSi0,9Cu	0,6- 1,1	0,8-1,2	0,2-0,8	0,5	0,6-1,1	0,25	0,10	Cr 0,10	0,15
AlSi0,8CuMg	1,1	1,2	0,8	0,5	1,0	0,2	0,1	Cr 0,1	0,15

Таблица П5

Система *Al-Cu-Mg*

Сплавы	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ti	Прочие	При- меси
<b>ГОСТ</b> Д1(1100)	3,8- 4,8	0,4-0,8	0,4-0,8	0,7	0,7	0,3	0,1	Ni 0,10	0,10
Д1ч(1100ч) 3,8-4,8	0,4- 0,8	0,4-0,8	0,4-0,8	0,4	0,5-0,7	0,3	0,1	Ni 0,10	0,10
В65(1157)	3,9- 4,5	0,15-0,3	0,3-0,5	0,2	0,25	0,1	0,1	-	0,15
Д16 (1160)	3,8- 4,9	1,2-1,8	0,3-0,9	0,5	0,5	0,3	0,1	Ni 0,1	0,10
1163	3,8- 4,5	1,2-1,6	0,4-0,8	0,15	0,1	0,1	0,07	Ni 0,05	0,10
1161	3,35 - 3,85	1,4-1,8	0,4-0,7	0,15	0,05	0,05	0,07	Cr 0,04; Zr 0,08-0,16	0,15
Д18(1180)	2,2- 3,0	0,2-0,5	0,2	0,5	0,5	0,1	0,1	-	0,10
Д19(1190)	3,8- 4,3	1,7-2,3	0,5-1,0	0,5	0,5	0,1	0,1	Be до 0,005	0,10
Д19ч(1190ч)	3,8- 4,3	1,7-2,3	0,4-0,9	0,3	0,2	0,1	0,1	Be до 0,005	0,10
ВД17(1170)	2,6- 3,2	2,0-2,4	0,45- 0,7	0,3	0,3	0,1	0,1	-	0,10
Д24(1191)	3,8- 4,5	2,3-2,7	0,35- 0,8	0,3	0,2	0,1	0,03 -0,1	Be до 0,005; Zr 0,07-0,20	0,10
Д21(1210)	6,0- 7,0	0,25- 0,45	0,4-0,8	0,3	0,3	0,1	0,1- 0,2	-	0,10

Окончание табл. П5

Сплавы	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ti	Прочие	При- меси
Д20(1200)	6,0- 7,0	0,05	0,4-0,8	0,3	0,3	0,1	0,1- 0,2	Zr 0,2	0,10
<b>ASTM</b> AA2017	3,5- 4,5	0,4-0,8	0,4-1,0	0,7	0,2-0,8	0,25	0,15	Cr 0,10	0,15
AA2024	3,8- 4,9	1,2-1,8	0,3-0,9	0,5	0,5	0,25	0,15	Cr 0,10	0,15
AA2124	3,8- 4,9	1,2-1,8	0,3-0,9	0,3	0,2	0,25	0,15	Cr 0,10	0,15
AA2224	3,8- 4,4	1,2-1,8	0,3-0,9	0,15	0,12	0,25	0,15	Cr 0,10	0,15
AA2324	3,8- 4,4	1,2-1,8	0,3-0,9	0,12	0,1	0,25	0,15	Cr 0,10	0,15
AA2034	4,2- 4,8	1,3-1,9	0,8-1,3	0,12	0,1	0,2	0,15	Cr 0,05; Zr 0,16; Be до 0,008	0,15
AA2048	2,8- 3,8	1,2-1,8	0,2-0,6	0,20	0,15	0,25	0,10	Zr 0,08- 0,15	0,15
AA2117	2,2- 3,0	0,2-0,5	0,2	0,7	0,8	0,25	-	Cr 0,10	0,15
AA2036	2,2- 3,0	0,3-0,6	0,1-0,4	0,5	0,5	0,25	0,15	Cr 0,10	0,15
<b>DIN</b> AlCu4Mg1	3,5- 4,5	0,4-1,0	0,4-1,0	0,7	0,2-0,8	0,25	-	Cr 0,10	0,15
AlCu4Mg	3,8- 4,9	1,2-1,8	0,3-0,9	0,5	0,5	0,25	0,15	Cr 0,10	0,15
AlCu4Mg(A)	3,8- 4,9	1,2-1,8	0,3-0,9	0,3	0,2	0,25	0,15	Cr 0,10	0,15
AlCu2,5Mg	2,2- 3,0	0,2-0,5	0,2	0,7	0,8	0,25	-	Cr 0,10	0,15

Таблица П6

Система *Al-Cu-Mg-Ni-Fe*

Сплавы	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ti	Прочие	При- меси
<b>ГОСТ</b> АК4(1140)	1,9- 2,5	1,4-1,8	0,2	0,8- 1,3	0,5-1,2	0,3	0,1	Ni 0,8-1,3	0,10
АК4-1(1141)	1,9- 2,7	1,2-1,8	0,2	0,8- 1,4	0,35	0,3	0,02- 1,1	Cr 0,1; Ni 0,8-1,4	0,10
АК4-1ч	2,0- 2,6	1,2-1,8	0,1	0,9- 1,4	0,1-0,25	0,1	0,05- 0,1	Cr 0,1; Ni 0,8-1,4	0,10

Окончание табл. П6

Сплавы	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ti	Прочие	При- меси
АК4-2ч	2,0- 2,6	1,2-1,8	0,1	0,4- 0,7	0,1-0,25	0,1	0,05 -0,1	Cr 0,1; Ni 0,4-0,7	0,10
<b>ASTM</b> AA2618	1,9- 2,7	1,3-1,8	-	0,9- 1,3	0,1-0,25	0,1	0,04 -0,1	Ni 0,9-1,2	0,15
AA2018	3,5- 4,5	0,45-0,9	0,2	1,0	0,9	0,25	-	Cr 0,1; Ni 1,7-2,3	0,15
AA2218	3,5- 4,5	1,2-1,8	0,2	1,0	0,9	0,25	-	Cr 0,1; Ni 1,7-2,3	0,15

Таблица П7

Система *Al-Cu-Mg-Mn-Si*

Сплавы	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ti	Прочие	При- меси
<b>ГОСТ</b> АК6(1360)	1,8- 2,6	0,4-0,8	0,4-0,8	0,7- 1,2	0,7-1,2	0,3	0,1	Ni 0,10	0,10
АК6-1	1,8- 2,6	0,40,8	0,4-0,8	0,7	0,7-1,2	0,3	0,02 -0,1	Cr 0,01- 0,20; Ni 0,1	0,10
АК6ч	1,8- 2,6	0,4-0,8	0,4-0,8	0,4	0,7-1,2	0,3	0,10	Ni 0,01	0,10
АК8(1380)	3,9- 4,8	0,4-0,8	0,4-1,0	0,7	0,6-1,2	0,3	0,10	Ni 0,10	0,10
1201	5,8- 6,8	0,02	0,2-0,4	0,3	0,2	0,1	0,02 -0,1	V 0,05- 0,15	0,15
1205	5,8- 6,8	0,02	0,3-0,8	0,3	0,3	0,1	0,02 -0,1	Zr 0,10- 0,25; Cd 0,1-0,2	0,15
AA2014	3,9- 5,0	0,2-0,8	0,4-1,2	0,7	0,5-1,2	0,25	0,15	Cr 0,10	0,15
AA2214	3,9- 5,0	0,2-0,8	0,4-1,2	0,3	0,5-1,2	0,25	0,15	Cr 0,10	0,15
AA2219	5,8- 6,8	0,02	0,2-0,4	0,3	0,2	0,1	0,02 -0,1	V 0,05- 0,15; Zr 0,10-0,25	0,15
AA2319	5,8- 6,8	0,02	0,2-0,4	0,3	0,2	0,1	0,1- 0,2	V 0,05- 0,15; Zr 0,10-0,25	0,15
AA2419	5,8- 6,8	0,02	0,2-0,4	0,18	0,15	0,1	0,02 -0,1	V 0,05- 0,15; Zr 0,10-0,25	0,15
AA2519	5,3- 6,4	0,05-0,4	0,1-0,5	0,3	0,25	0,10	0,02 -0,1	V 0,05- 0,15; Zr 0,10-0,25	0,15

Окончание табл. П7

Сплавы	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ti	Прочие	При- меси
AA2011	5,0- 6,0	-	-	0,7	0,4	0,3	-	Bi 0,2-0,6; Pb 0,2-0,6	0,15
AA2037	1,4- 2,2	0,3-0,8	0,1-0,4	0,5	0,5	0,25	0,15	Cr 0,1; V 0,05	0,15
AA2038	0,8- 1,8	0,4-1,0	0,1-0,4	0,6	0,5-1,3	0,5	0,15	Cr 0,2; Ca 0,05; V 0,05	0,15
AA2025	3,9- 5,0	0,05	0,4-1,2	1,0	0,5-1,2	0,25	0,15	Cr 0,10	0,15
<b>DIN</b> AlCu4SiMn	3,9- 5,0	0,2-0,8	0,4-1,2	0,7	0,5-1,2	0,25	0,15	Cr 0,10	0,15
AlCu6Mn(A)	5,8- 6,8	0,02	0,2-0,4	0,3	0,2	0,1	0,10	-	0,15
AlCu6BiPb	5,0- 6,0	-	-	0,7	0,4	0,3	-	Bi 0,2-0,6; Pb 0,2-0,6	0,15

Таблица П8

Система *Al-Mg-Zn-Cu*

Сплавы	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ti	Прочие	При- меси
<b>ГОСТ</b> B95(1950)	1,4- 2,0	1,8-2,8	0,2-0,6	0,5	0,5	5,0- 7,0	0,05	Cr 0,1- 0,25; Ni 0,1	0,10
B95Пч	1,4- 2,0	1,8-2,8	0,2-0,6	0,05 - 0,25	0,1	5,0- 6,5	0,05	Cr 0,1- 0,25; Ni 0,1	0,10
B95оч	1,4- 2,0	1,0-2,8	0,2-0,6	0,15	0,1	5,0- 6,5	0,05	Cr 0,1- 0,25; Ni 0,1	0,12
1973	1,4- 2,0	2,0-2,6	0,1	0,15	0,1	5,5- 6,7	0,02 - 0,07	Cr 0,05; Zr 0,08-0,16	0,10
B93(1930)	0,8- 1,2	1,6-2,2	0,1	0,2- 0,45	0,3	6,3- 7,3	0,1	-	0,10
B93Пч	0,8- 1,2	1,6-2,2	0,1	0,2- 0,4	0,1	6,5- 7,3	0,1	-	0,10
1933	0,8- 1,2	1,6-2,2	0,1	0,06 - 0,15	0,1	6,35 -7,2	0,03 - 0,06	Cr 0,05; Zr 0,10-0,18	0,10
B96Ц(1960)	2,0- 2,6	2,3-3,0	0,1	0,4	0,3	0,8- 9,0	0,03	Cr 0,05; Zr 0,1-0,2	0,10
B96ЦПч	2,0- 2,6	2,3-3,0	0,1	0,15	0,1	8,0- 9,0	-	Cr 0,05; Zr 0,1-0,2	0,10

Продолжение табл. П8

Сплавы	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ti	Прочие	При- меси
B96Ц-3(1965)	1,4- 2,0	1,7-2,3	0,05	0,2	0,1	7,6- 8,6	0,05	Cr 0,05; Zr 0,1-0,2	0,10
1915	0,1	1,3-1,8	0,2-0,6	0,4	0,3	3,4- 4,0	0,1	Cr 0,08- 0,20; Zr 0,15-0,22	0,10
<b>ASTM</b> AA7075	1,2- 2,0	2,1-2,9	0,3	0,5	0,4	5,1- 6,1	0,2	Cr 0,18- 0,28	0,10
AA7175	1,2- 2,0	2,1-2,9	0,1	0,2	0,15	5,1- 6,1	0,1	Cr 0,18- 0,28	0,15
AA7475	1,2- 1,9	1,9-2,6	0,06	0,12	0,1	5,2- 6,2	0,06	Cr 0,18- 0,25	0,15
AA7050	2,0- 2,6	1,9-2,6	0,1	0,15	0,12	5,7- 6,7	0,06	Cr 0,04; Zr 0,08-0,15	0,15
AA7150	1,9- 2,5	2,0-2,7	0,1	0,15	0,12	5,9- 6,9	0,06	Cr 0,04; Zr 0,08-0,15	0,15
AA7076	0,3- 1,0	1,2-2,0	0,3-0,8	0,6	0,4	7,0- 8,0	0,20	-	0,15
AA7049	1,2- 1,9	2,0-2,9	0,2	0,35	0,25	7,2- 8,2	0,10	Cr 0,1; Zr 0,1-0,2	0,15
AA7005	0,1	1,0-1,8	0,2-0,7	0,4	0,35	4,0- 5,0	0,01 - 0,06	Cr 0,06- 0,20; Zr 0,08-0,20	0,15
AA7004	-	1,0-2,0	0,2-0,7	0,35	0,25	3,8- 4,6	0,05	Cr 0,05; Zr 0,1-0,2	0,15
AA7008	0,05	0,7-1,4	0,05	0,10	0,10	4,5- 5,5	0,05	Cr 0,12- 0,25	0,10
AA7108	0,05	0,7-1,4	0,05	0,10	0,10	4,5- 5,5	0,05	Zr 0,12- 0,25	0,15
<b>DIN</b> AlZr5,5MgCu	1,2- 2,0	2,1-2,9	0,3	0,5	0,4	5,1- 6,1	0,2	Cr 0,18- 0,28	0,15
AlZr5,5MgCu (A)	1,2- 1,9	1,9-2,6	0,06	0,12	0,10	5,2- 6,2	0,06	Cr 0,18- 0,25	0,15
AlZn6CuMgZr	2,0- 2,6	1,9-2,6	0,1	1,15	0,12	5,7- 6,7	0,06	Cr 0,04; Zr 0,08-0,15	0,15
AlZn6CuMgZr (A)	1,9- 2,5	2,0-2,7	0,1	1,15	0,12	5,6- 6,9	0,06	Cr 0,04; Zr 0,08-0,15	0,15
AlZn4,5Mg1,5 Mn	0,10	1,0-1,8	0,2-0,7	0,4	0,35	4,0- 5,0	0,01 - 0,06	Cr 0,06- 0,20; Zr 0,08-0,20	0,15
AlZn5Mg1Zr	0,05	0,7-1,4	0,05	0,10	0,10	4,5- 5,5	0,05	Zr 0,12- 0,25	0,15

Таблица П9

Система *Al-Zn-Mg*

Сплавы	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ti	Прочие	При- меси
<b>ГОСТ</b> 1925	0,8	1,3-1,8	0,2-0,7	0,7	0,7	3,4- 4,0	0,10	Cr 0,20; Zr 0,1-0,2	0,10
1901	0,2	2,4-3,0	0,1-0,3	0,3	0,2	5,4- 6,2	0,02 -0,1	Cr 0,12- 0,25; Zr 0,07-0,12; Be до 0,005	0,10
1903	0,2	2,1-2,6	0,05- 0,15	0,35	0,25	4,7- 5,3	0,03 -0,1	Cr 0,12- 0,25; Zr 0,07-0,12; Be до 0,005	0,10
1905	1,0- 3,0	0,6-3,0	0,2-1,0	1,5	1,5	0,8- 4,0	0,2	Cr 0,25; Ni 0,20	0,20
1911	0,1- 0,2	1,6-2,1	0,2-0,5	0,3	0,2	3,8- 4,4	-	Cr 0,07- 0,25; Zr 0,13-0,22	0,10
B91(1913)	0,3- 1,0	1,6-2,0	0,2-0,5	0,5	0,3	3,7- 4,5	-	Cr 0,10- 0,25	0,10
B92(1920)	0,05	3,9-4,6	0,6-1,0	0,3	0,2	2,9- 3,6	0,2	Be до 0,005	0,10
1935	0,2	0,6-1,1	0,2-0,5	0,4	0,3	3,6- 4,1	-	Cr 0,20; Zr 0,15-0,22; Ge 0,0001- 0,005	0,20
<b>ASTM</b> AA7039	0,1	2,3-3,3	0,1-0,4	0,4	0,3	3,5- 4,5	0,1	Cr 0,15- 0,25	0,15
<b>DIN</b> AlZn4Mg3	0,1	2,3-3,3	0,1	0,4	0,3	3,5- 4,5	0,1	Cr 0,15- 0,25	0,15

Таблица П10

Система *Al-Mg-Zn-Cu*

Сплавы	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ti	Прочие	При- меси
<b>ГОСТ</b> B94(1940)	1,8- 2,4	1,2-1,6	0,10	0,2	0,2	5,9- 6,8	0,02 - 0,08	Cr 0,03	0,10
1955	0,2- 0,6	0,7-1,2	0,2	0,7	0,3	4,6- 5,4	0,10	Cr 0,08- 0,15; Zr 0,10-0,22; Ce до 0,10	0,10
1953	0,4- 0,8	2,4-3,0	0,1-0,3	0,25	0,20	5,6- 6,2	0,02 -0,1	Cr 0,15- 0,25; Zr 0,1	0,10



Продолжение табл. П10

Сплавы	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ti	Прочие	При- меси
АК12Д	1,5- 3,0	0,8-1,3	0,3-0,6	0,7	11-13	0,5	0,05 -0,2	Cr 0,2; Ni 0,8-1,3; B 0,005; Sn 0,02; Pb0,1	0,15
<b>ASTM</b> AA7016	0,45 -1,0	0,8-1,4	0,03	0,12	0,10	4,0- 5,0	0,03	V 0,05	0,10
AA7029	0,5- 0,9	1,3-2,0	0,03	0,12	0,10	4,2- 5,2	0,05	V 0,05	0,10
AA7129	0,5- 0,9	1,3-2,0	0,10	0,30	0,15	4,2- 5,2	0,05	Cr 0,1; Ga 0,03	0,15
AA7001	1,6- 2,6	2,6-3,4	0,20	0,40	0,35	6,8- 8,0	0,2	Cr 0,18- 0,35	0,15
AA7104	0,03	0,5-0,9	-	0,40	0,25	3,8- 4,4	0,1	-	0,15
AA7021	0,25	1,2-1,8	0,10	0,40	0,25	5,0- 6,0	0,1	Cr 0,05; Zr 0,08-0,18	0,15
AA7046	0,25	1,0-1,6	0,30	0,40	0,20	6,6- 7,8	0,06	Cr 0,20; Zr 0,10-0,18	0,15
AA7146	-	1,0-1,6	-	0,4	0,2	6,6- 7,6	0,06	Zr 0,10- 0,18	0,15
AA7049	1,2- 1,9	2,0-2,9	0,2	0,35	0,25	7,2- 8,2	0,10	Cr 0,10- 0,22	0,15
AA7277	0,8- 1,7	1,7-2,3	-	0,7	0,5	3,7- 4,3	0,10	Cr 0,18- 0,35	0,15
AA7079	0,4- 0,8	2,9-3,7	0,1-0,3	0,4	0,3	3,8- 4,8	0,10	Cr 0,10- 0,25	0,15
AA7179	0,4- 0,8	2,9-3,7	0,1-0,3	0,2	0,15	3,8- 4,8	0,10	Cr 0,10- 0,25	0,15
AA4004	0,25	1,0-2,0	0,10	0,8	9,0-10,5	0,2	-	-	0,15
AA4032	0,5- 1,3	0,3-1,3	-	1,0	11,0- 13,5	0,25	0,04 - 0,15	Cr 0,1; Ni 0,5-1,3	0,15
AA4043	0,3	0,05	0,05	0,8	4,5-6,0	0,10	0,20	-	0,15
AA4343	0,25	-	0,10	0,8	6,8-8,2	0,20	-	-	0,15
AA4543	0,10	0,1-0,4	0,05	0,5	5,0-7,0	0,10	0,10	Cr 0,05	0,15
AA4643	0,10	0,1-0,3	0,05	0,8	3,6-4,6	0,10	0,15	-	0,15
AA4044	0,25	-	0,10	0,8	4,8-9,2	0,20	-	-	0,15
AA4045	0,30	0,05	0,05	0,8	9,0-11,0	0,10	0,20	-	0,15
AA4145	3,3- 4,7	0,15	0,15	0,8	9,3-10,7	0,20	-	Cr 0,15	0,15

Продолжение табл. П10

Сплавы	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ti	Прочие	При- меси
AA4047	0,3	0,1	0,15	0,8	11,0- 13,0	0,20	-	-	0,15
AA8001	0,15	-	-	0,45 -0,7	0,17	0,05	-	Ni 0,9-1,0	0,15
AA8006	0,30	0,10	0,3-1,0	1,2- 2,0	0,40	0,10	-	-	0,15
AA8007	0,10	0,10	0,3-1,0	1,2- 2,0	0,40	0,8- 1,8	-	-	0,15
AA8111	0,10	0,05	0,10	0,4- 1,0	0,3-1,1	0,10	0,05	Cr 0,05	0,15
AA8112	0,40	0,70	0,60	1,0	1,0	1,0	0,20	Cr 0,20	0,15
AA8014	0,20	0,10	0,2-0,6	1,2- 1,6	0,3	0,1	0,1	-	0,15
AA8017	0,1- 0,2	0,01- 0,05	-	0,55 -0,8	0,1	0,05	-	B 0,04; Li 0,003	0,10
AA8020	0,005	-	0,005	0,10	0,10	0,005	-	V 0,05; Bi 0,1-0,5; Sn 0,10-0,25	0,10
AA8030	0,15- 0,30	0,05	-	0,3- 0,8	0,10	0,05	-	B 0,001- 0,004	0,10
AA8130	0,05- 0,15	-	-	0,4- 1,0	0,15	0,10	-	-	0,10
AA8040	0,20	-	0,05	Fe+ Si	1,0	0,20	-	Zr 0,1-0,3	0,15
AA8076	0,04	0,08- 0,22	-	0,6- 0,9	0,1	0,05	-	B 0,04	0,10
AA8077	0,05	0,1-0,3	-	0,1- 0,4	0,1	0,05	-	B 0,05	0,10
AA8177	0,04	0,04- 0,12	-	0,25 - 0,45	0,1	0,05	-	B 0,04	0,10
AA8079	0,05	-	-	0,7- 1,3	0,05- 0,30	0,10	-	-	0,15
AA8280	0,7- 1,3	-	0,10	0,7	1,0-2,0	0,05	0,10	N 0,2-0,7; Sn 5,5-7,0	0,15
AA8081	0,7- 1,3	-	0,10	0,7	0,7	0,05	0,10	Sn 18,0- 22,0	0,15
<b>DIN</b> AlZn4,5Mg1Cu	0,45 -1,0	0,8-1,4	0,03	0,12	0,10	4,0- 5,0	0,03	-	0,15
AlZn4,5Mg 1,5Cu	0,5- 0,9	1,3-2,0	0,03	0,12	0,10	4,2- 5,2	0,05	-	0,15

## Окончание табл. П10

Сплавы	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ti	Прочие	При- меси
AlZnMgCu0,5	0,5- 1,0	2,6- 3,6	0,1- 0,4	0,5	0,5	4,3- 5,2	0,20	Cr 0,1-0,3; V 0,05	0,15
AlZn5,5Mg1,5	0,25	1,2- 1,8	0,10	0,4	0,25	5,0- 6,0	0,10	Cr 0,05; Zr 0,08-0,18	0,15
AlSi10Mg1,5	0,25	0,1- 0,2	0,10	0,8	9,0- 10,5	0,2	-	Cr 0,10	0,15
AlSi12,5MgCu	0,5- 1,3	0,8- 1,3	-	1,0	11,0- 13,5	0,25	-	Cr 0,10	0,15
AlSi10	0,3	0,03	0,05	0,8	9,0- 11,5	0,10	0,20	-	0,15
AlFe1,5Mn	0,3	0,1	0,3- 1,0	1,2- 2,0	0,4	0,10	-	-	0,15
AlFeSi(B)	0,1	0,05	0,10	0,4- 1,0	0,3- 1,1	0,10	0,08	Cr 0,05	0,15
A195	0,4	0,7	0,6	1,0	1,0	1,0	0,20	Cr 0,20	0,15
AlFe1,5Mn0,4	0,2	0,1	0,2- 0,6	1,2- 1,6	0,3	0,1	0,10	Cr 0,10	0,15
AlFe1Si	0,05	-	-	0,7- 1,3	0,05- 0,30	0,1	-	-	0,15

## Таблица П11

## Сплавы магния по ГОСТ 14957-76

Сплавы	Al	Zn	Mn	Zr	Cd	Ca	Li	Y	РЗМ	При- меси
MA1	0,3	0,3	1,3- 2,5	-	-	-	-	-	-	0,4
MA2	3,0- 4,0	0,2- 0,8	0,15- 0,5	-	-	-	-	-	-	0,3
MA2-1	3,8- 5,0	0,8- 1,5	0,3- 0,7	-	-	-	-	-	-	0,35
MA3	5,5- 7,0	0,5- 1,5	0,15- 0,5	-	-	-	-	-	-	0,35
MA5	7,8- 9,2	0,2- 0,8	0,15- 0,5	-	-	-	-	-	-	0,35
MA8	0,3	0,15- 0,3	1,3- 2,2	-	-	-	-	-	-	0,40
MA9	0,4- 0,8	0,1	1,0- 1,8	-	-	0,08- 0,30	-	-	-	0,35
MA11	0,2	0,2	1,5- 2,5	0,1- 0,25	-	-	-	-	Nd 2,5- 4,0	0,35

Окончание табл. П11

Сплавы	Al	Zn	Mn	Zr	Cd	Ca	Li	Y	РЗМ	При- меси
МА14	-	5,0- 5,6	-	0,3- 0,9	-	-	-	-	-	0,3
МА15	-	2,5- 3,5	-	-	1,2- 2,0	-	-	-	La 0,7- 1,1	0,3
МА19	-	5,5- 7,0	-	-	0,2- 1,0	-	-	-	Nd 1,4- 2,0	0,35
МА20	-	1,0- 1,5	-	0,05- 0,12	-	-	-	-	Ce 0,12-0,2	0,35
МА12	-	-	-	0,3- 0,8	-	-	-	-	Nd 2,5- 3,5	0,30
МА18	0,5- 1,0	0,1- 0,4	2,0- 2,5	-	-	-	10,0- 11,5	-	Ce 0,15- 0,35	0,35
МА21	4,0- 6,0	0,1- 0,4	0,8- 2,0	-	3,0- 5,0	-	7,0- 9,0	-	-	0,35
ВМ17	0,3	2,5- 2,8	1,4- 2,2	-	-	-	-	-	Ce до 3,5	0,35
ВМ65-1	0,05	4,0- 5,5	0,01	-	-	-	-	-	-	0,3
ВМД3	-	2,5- 3,5	-	0,45- 0,9	1,2- 2,0	0,5-1,0	-	-	La 0,5- 1,0	0,35
ВМД10	-	-	0,4- 0,6	-	-	-	-	7,8- 9,0	Ce 0,05- 0,15	0,35
ИМБ6	-	-	0,4- 0,6	-	-	-	-	-	Ce 0,05- 0,15	0,35
ВДМ-1	-	1,2- 2,0	-	-	-	-	-	-	Th 2,5- 3,5	-
<b>ASTM</b>										
AZ10A	1,2	0,4	0,2	-	-	-	-	-	-	0,3
AZ31B	3,0	1,0	0,2	-	-	-	-	-	-	0,3
AZ61A	6,0	1,0	0,2	-	-	-	-	-	-	0,3
ZK21A	-	2,3	-	0,5	-	-	-	-	-	0,3
ZK40A	-	4,0	-	0,5	-	-	-	-	-	0,3
ZK60A	-	5,5	-	0,6	-	-	-	-	-	0,3
HK31A	-	-	-	0,6	-	-	-	-	Th 3,0	0,2
HM21A	-	-	0,6	-	-	-	-	-	Th 2,0	0,2
HM31A	-	-	1,2	-	-	-	-	-	Th 3,0	0,2

*Учебное издание*

**Буркин Сергей Павлович**  
**Бабайлов Николай Александрович**  
**Овсянников Борис Владимирович**

## Сопротивление деформации сплавов Al и Mg

Редактор *И.Г. Южакова*  
Компьютерный набор *Е.А. Андрюкова*

---

Подписано в печать 01.06.2010		Формат	60x84
1/16			
Бумага писчая	Плоская печать	Усл. печ. л. 20,19	
Уч.-изд. л. 19,5	Тираж 250 экз.	Заказ 1561	

---

Редакционно-издательский отдел УрФУ  
620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19  
[rio@mail.ustu.ru](mailto:rio@mail.ustu.ru)

Типография Свердловского областного негосударственного  
фонда развития предпринимательства  
«Екатеринбургская ассоциация малого бизнеса»  
620026, г. Екатеринбург, ул. Розы Люксембург, 59.  
Тел.(343)251-65-91, 229-53-94